

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a zařízení

Laboratorní plazmová pec
Laboratory Plasma Furnace

Student:

Bc. Klimek Ondřej

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Zdeněk Noga, CSc.

Ostrava 2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Klimek**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství**
Specializace: **20 Výrobní stroje a zařízení**
Téma: **Laboratorní plazmová pec**
Laboratory Plasma Furnace
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

Pro možné uplatnění v oblasti materiálového výzkumu rozpracujte technické řešení laboratorní plazmové pece dle českého patentového spisu 304 722.

Proveďte :

1. Technickou zprávu s popisem funkce navrženého zařízení a nezbytnými výpočty ve členění – upřesnění zadání, seznam požadavků, funkční struktura, morfologická matice, orgánová a hrubá stavební struktura.
2. 3D model konstrukčního návrhu zařízení.
3. Výrobní výkresovou dokumentaci zařízení.

Rozsah výtahu z rešerše z Diplomového projektu v textové části práce cca 5str., rozsah výkresové části min. 2A0.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory.*

Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura.*

Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

HUBKA, V. *Konstrukční nauka.*

Zürich: Heurista, 1995, 105s. ISBN 80-90 1135-0-8

Zásady pro vypracování diplomové (bakalářské) práce.

FS_SME_05_003 verze: G

LITERÁRNÍ REŠERŠE – zpracovaná v rámci Diplomového projektu.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Noga, CSc.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

15.5. 2018

klk

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:

15.5. 2018

klk

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Ondřej Klimek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Husitská 340

735 32 Rychvald

Česká republika

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KLIMEK, Ondřej. *Laboratorní plazmová pec*. Ostrava, 2018, 85 s. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Noga, CSc.

Diplomová práce se zabývá kompletním návrhem laboratorní plazmové pece s výjimkou hořáku plazmové pece, který bude použit již vyrobený. Hlavní podmínkou je navrhnout pec, která bude splňovat požadavky na přetavování titanu, niklu a jejich slitin a nepřesáhne rozměry laboratoře. V neposlední řadě dodrží veškeré bezpečnostní předpisy. První část práce obsahuje shrnutí rešerší jednotlivých částí pece použitých při návrhu plazmové pece. Dále se diplomová práce zabývá konstrukčním návrhem obsahujícím upřesnění zadání, požadavkový list, funkční a orgánovou strukturu, hrubou a stavební strukturu. Druhá část práce obsahuje již samotný konstrukční návrh jednotlivých dílů plazmové pece a jejich kontrolní výpočty, technickou zprávu, která shrnuje jednotlivé konstrukční návrhy, popis jednotlivých částí a také výrobní proces části pece. Závěr práce řeší teplotní a pevnostní analýzu vybraných částí pomocí metody konečných prvků.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

KLIMEK, Ondřej. *Laboratory Plasma Furnace*. Ostrava, 2018, 85 s. Master thesis. VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design. Thesis lead: Ing. Zdeněk Noga, CSc.

This thesis deals with the complete design of the laboratory plasma furnace except for the burner of the plasma furnace, where will be used an already manufactured burner. The main prerequisite is to design a furnace that will meet the requirements for the recasting of titanium, nickel and their alloys. Furthermore, it will not exceed the dimensions of the laboratory and also comply with all safety regulations. The first part of the thesis contains a summary of the research for the individual parts of the furnace used in the plasma furnace design. Another part of the diploma thesis is a construction proposal containing the specification of the assignment, request sheet, functional and organ structure, rough draft and building structure. The next part of the thesis contains the structural design of the individual parts for the plasma furnace as well as their control calculations, a technical report which summarizes the individual construction proposals, description of the individual parts and also the production process of the furnace part. The conclusion of the thesis contains the temperature and strength analysis of selected parts using the finite element method.

Obsah

Přehled použitých značek	9
1 Úvod.....	15
2 Rešerše	16
2.1 Titan a jeho slitiny.....	16
2.2 Měď	17
2.3 Nikl.....	17
2.4 Ochranné atmosféry	18
2.4.1 Aktivní plyn	18
2.4.2 Inertní plyn.....	19
2.5 Aktuátory.....	20
2.6 Rozvod chladicí kapaliny	22
2.7 Patentové podklady	23
2.8 Prostup tepla.....	24
2.8.1 Prostup tepla při konvekci	24
2.8.2 Přestup tepla při radiaci (záření).....	24
3 Konstrukční návrh.....	26
3.1 Upřesnění zadání.....	26
3.2 Požadavkový list	26
3.3 Kritéria pro hodnocení	28
3.4 Transformační schéma	28
3.5 Funkční struktura	29
3.6 Morfologická matice	31
3.7 Orgánová struktura.....	32
3.8 Hrubá stavební struktura	33
3.9 Úplná stavební struktura	34
4 Konstrukční návrh jednotlivých částí pece	36
4.1 Konstrukční návrh krystalizátoru.....	36
4.1.1 Návrh chlazení krystalizátoru	38
4.1.2 Výpočet třecích a místních ztrát	41
4.2 Konstrukční návrh lící pánve	44
4.2.1 Stanovení chladicího výkonu.....	44
4.2.2 Návrh chlazení lící pánve	44
4.2.3 Výpočet třecích a místních ztrát	49
4.2.4 Návrh výklopného mechanismu lící pánve.....	51

4.3	Konstrukční návrh podavače, rámu podavače	55
4.4	Konstrukční návrh tažení kontislitku	58
4.4.1	Návrh chlazení zátky	59
4.4.2	Výpočet třecích a místních ztrát	59
4.5	Konstrukční návrh víka pece:.....	61
4.5.1	Návrh chlazení víka	61
4.5.2	Výpočet třecích a místních ztrát	62
4.6	Konstrukce tvaru a chlazení sekce podávací a hořákové:.....	63
4.6.1	Stanovení radiačního toku	63
4.6.2	Výpočet chlazení pro podávací a hořákovou sekci.....	65
4.6.3	Výpočet třecích a místních ztrát	66
4.7	Konstrukce tvaru a chlazení sekce s krystalizátorem:.....	67
4.7.1	Návrh chlazení sekce s krystalizátorem.....	67
4.7.2	Ověření snížení radiačního toku vloženou izolační vrstvou.....	68
4.7.3	Třecí a místní ztráty v proudění	69
4.8	Konstrukce tvaru a chlazení sekce pro tažení a dochlazování	70
4.8.1	Návrh chlazení sekce pro tažení a dochlazování	70
4.8.2	Výpočet třecí a místních ztrát	71
4.9	Návrh čerpadla chladicí vody.....	72
4.9.1	Součet celkových místních a tlakových ztrát v jednotlivých okruzích.....	72
4.9.2	Volba ostatních komponentů chladicího okruhu	73
4.9.3	Volba čerpadla a elektromotoru.....	73
4.10	Návrh systému sání.....	73
5	Technická zpráva	74
5.1	Popis jednotlivých částí pece	74
6	MKP analýza.....	84
6.1	Teplotní analýza průběhu teploty v polotovaru podavače	84
6.2	Pevnostní analýza rámu.....	86
7	Závěr	89
8	Poděkování.....	89
9	Použitá literatura	90
10	Seznam příloh	91

Přehled použitých značek

Tab. 1 Přehled použitých značek a veličin

Značka	Popis	Jednotka
C_o	Součinitel záření absolutně černého tělesa	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$
F_2	Zatěžující síla pera	$[N]$
F_3	Střížná síla	$[N]$
G_1	Tíhová síla od taveniny	$[N]$
G_2	Tíhová síla působící ve středu licí pánve	$[N]$
L_{Ti}	Skupenské teplo tuhnutí materiálu	$[J \cdot kg^{-1}]$
$M_{k;1}$	Krouticí moment při odlévání	$[Nm]$
$M_{o;1}$	Ohybový moment od tíhové síly licí pánve	$[Nm]$
MO_1	Ohybový moment působící na rám podavače	$[Nm]$
MO_2	Ohybový moment působící na rám podavače	$[Nm]$
Nu	Nusseltovo číslo	$[-]$
o_v	Obvod chladicího kanálku	$[m]$
P	Maximální výkon plazmového hořáku	$[W]$
$P_{Hčlp}$	Tepelný výkon působící na horní část licí pánve	$[W]$
P_{CH}	Chladicí výkon odvedený z licí pánve	$[W]$
P_1	Tepelný výkon odvedený stěnou licí pánve	$[W]$
Pr	Prandtlovo číslo	$[-]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
Re_{dlp}	Reynoldsovo číslo chladicího kanálku dna licí pánve	$[-]$
Re_{min}	Mez kluzu materiálu	$[MPa]$
Re_1	Mez kluzu materiálu podavače	$[MPa]$
Re_{pahs}	Reynoldsovo číslo pro chladicí kanálek podávací a hořákové sekce	$[-]$
$Re_{pot;1}$	Reynoldsovo číslo pro potrubí krystalizátoru	$[-]$
$Re_{pot;2}$	Reynoldsovo číslo pro potrubí licí pánve	$[-]$
$Re_{pot;3}$	Reynoldsovo číslo pro potrubí zátky	$[-]$
Re_{slp}	Reynoldsovo číslo chladicího kanálku stěny licí pánve	$[-]$
Re_{stad}	Reynoldsovo číslo chladicího kanálku sekce pro tažení a dochlazování	$[-]$
Re_{ssk}	Reynoldsovo číslo chladicího kanálku sekce s krystalizátorem	$[-]$
$Re_{víko}$	Reynoldsovo číslo pro víko	$[-]$
$Re_{zátky}$	Reynoldsovo číslo pro chladicí kanálek zátky	$[-]$
S_{CH}	Teplosměnná plocha chladicího kanálku	$[m^2]$
$S_{CH,k}$	Průřez chladicího kanálku v stěně krystalizátoru	$[m^2]$
$S_{CH,k;1}$	Průřez chladicího kanálku ve stěně licí pánve	$[m^2]$
$S_{CH,k;2}$	Průřez chladicího kanálku ve dně licí pánve	$[m^2]$
$S_{CH,k;3}$	Průřez chladicího kanálku v zátce	$[m^2]$
$S_{CH,k;4}$	Průřez chladicího kanálku ve víku	$[m^2]$
$S_{CH,k;5}$	Průřez chladicího kanálku podávací a hořákové sekce	$[m^2]$
$S_{CH,k;6}$	Průřez chladicího kanálku sekce s krystalizátorem	$[m^2]$
$S_{CH,k;7}$	Průřez chladicího kanálku sekce pro tažení a dochlazování	$[m^2]$
S_{vmk}	Plocha výpočtového modelu pro krystalizátor	$[m^2]$

S_{vmlp}	Plocha výpočtového modelu pro lící pánev	$[m^2]$
S_{ks}	Plocha kontislitku	$[m^2]$
S_{KR}	Plocha průřezu krystalizátoru	$[m^2]$
S_{Ok}	Plocha pece nad krystalizátorem	$[m^2]$
$S_{Ok;1}$	Plocha pece nad lící pánví	$[m^2]$
$S_{Ok;2}$	Plocha pece okolo kontislitku	$[m^2]$
S_{pol}	Plocha průřezu polotovaru	$[m^2]$
S_v	Plocha průřezu kanálku	$[m^2]$
$S_{v;1}$	Plocha průřezu kanálku stěny lící pánve	$[m^2]$
$S_{v;2}$	Plocha průřezu kanálku dna lící pánve	$[m^2]$
T_{pla}	Termodynamická teplota pro proud plazmatu	$[K]$
T_{Sp}	Termodynamická teplota stěny pece	$[K]$
T_{Tav}	Termodynamická teplota taveniny	$[K]$
$T_{Výs}$	Termodynamická teplota kontislitku na výstupu s krystalizátorem	$[K]$
$W_{k;1}$	Průřezový modul v krutu	$[mm^3]$
a	Rozměr chladicího kanálku	$[m]$
a_1	Rozměr chladicího kanálku ve stěně lící pánve	$[m]$
a_2	Rozměr chladicího kanálku ve dně lící pánve	$[m]$
a_{H_2O}	Měrná teplotní vodivost chladicí vody	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
a_{svaru}	Velikost svaru	$[m]$
b	Rozměr chladicího kanálku	$[m]$
b_1	Rozměr chladicího kanálku ve stěně lící pánve	$[m]$
b_2	Rozměr chladicího kanálku ve stěně lící pánve	$[m]$
b_{pera}	Šířka pera	$[m]$
c_{pH_2O}	Měrná tepelná kapacita vody	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_{Ti}	Měrná tepelná kapacita titanu	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
d_h	Hydraulický průměr kanálku	$[m]$
$d_{h;1}$	Hydraulický průměr kanálku stěny lící pánve	$[m]$
$d_{h;2}$	Hydraulický průměr kanálku dna lící pánve	$[m]$
$d_{h;3}$	Hydraulický průměr kanálku zátky	$[m]$
$d_{h;4}$	Hydraulický průměr kanálku víka	$[m]$
$d_{h;5}$	Hydraulický průměr kanálku podávací a hořákové sekce	$[m]$
$d_{h;6}$	Hydraulický průměr kanálku sekce s krystalizátorem	$[m]$
$d_{h;7}$	Hydraulický průměr kanálku sekce pro tažení a dochlazování	$[m]$
d_{chs}	Průměr sekce pro tažení a dochlazování	$[m]$
d_{KR}	Kruhový průřez krystalizátoru	$[m]$
d_{pec}	Průměr pece	$[m]$
$d_{pot.}$	Průměr potrubí	$[m]$
$d_{pot.;1}$	Průměr potrubí pro lící pánev	$[m]$
d_1	Průměr otočné hřídele	$[m]$
g	Tíhové zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
i_{CH}	Počet chladicích kanálků krystalizátoru	$[-]$
k	Absolutní drsnost stěn potrubí	$[m]$
k_s	Statická bezpečnost	$[-]$
k_1	Absolutní drsnost stěny krystalizátoru	$[m]$

l	Délka kanálku ve svislé části krystalizátoru	[m]
l'	Přímá délka boku pera	[m]
l_{had}	Délka hadice	[m]
$l_{had;1}$	Délka hadice pro lící pánve	[m]
$l_{had;2}$	Délka hadice pro zátku	[m]
$l_{had;3}$	Délka hadice pro víko	[m]
$l_{had;4}$	Délka hadice pro sekci tažení a dochlazování	[m]
l_{CH}	Minimální délka chladicího kanálku	[m]
l_{chs}	Délka sekce pro tažení a dochlazování	[m]
$l_{CH;1}$	Minimální délka chladicího kanálku ve stěně lící pánve	[m]
$l_{CH;2}$	Minimální délka chladicího kanálku ve dně lící pánve	[m]
$l_{CH;3}$	Minimální délka chladicího kanálku ve víku	[m]
$l_{CH;4}$	Minimální délka chladicího kanálku v sekci s krystalizátorem	[m]
$l_{CH;5}$	Minimální délka chladicího kanálku v sekci pro tažení a dochlazování	[m]
l_{KR}	Délka krystalizátoru	[m]
$l_{kan;1}$	Délka chladicího kanálku ve stěně lící pánve	[m]
$l_{kan;2}$	Délka chladicího kanálku ve dně lící pánve	[m]
$l_{kan;3}$	Délka chladicího kanálku ve víku	[m]
$l_{kan;4}$	Délka chladicího kanálku podávací a hořákové sekce	[m]
$l_{kan;5}$	Délka chladicího kanálku sekce s krystalizátorem	[m]
$l_{kan;6}$	Délka chladicího kanálku sekce pro tažení a dochlazování	[m]
l_{pec}	Výška pece nad krystalizátorem	[m]
l_{pera}	Délka pera	[m]
l_{svaru}	Délka svaru	[m]
m_{tav}	Hmotnost taveniny v lící pánvi	[kg]
m_2	Celková hmotnost lící pánve	[kg]
n	Počet stínících prvků	[-]
o_v	Obvod chladicího kanálku krystalizátoru	[m]
$o_{v;1}$	Obvod chladicího kanálku stěny lící pánve	[m]
$o_{v;2}$	Obvod chladicího kanálku dna lící pánve	[m]
$p_{c,1}$	Celková ztráta ve víku	[Pa]
$p_{c,2}$	Celková ztráta v podávací a hořákové sekci	[Pa]
$p_{c,3}$	Celková ztráta v lící pánvi	[Pa]
$p_{c,4}$	Celková ztráta v krystalizátoru	[Pa]
$p_{c,5}$	Celková ztráta v sekci s krystalizátorem	[Pa]
$p_{c,6}$	Celková ztráta v sekci pro tažení a dochlazování	[Pa]
p_{D2}	Dovolené otláčení pera	[MPa]
p_{zt}	Tlaková ztráta třením v krystalizátoru	[Pa]
p_{zt1}	Tlaková ztráta třením v jedné větvi krystalizátoru	[Pa]
p_{zt2}	Tlaková ztráta v rychlospojce	[Pa]
$p_{zt;3}$	Tlaková ztráta v potrubí pro lící pánve	[Pa]
p_{zt4}	Tlaková ztráta v kanálku stěny lící pánve	[Pa]
p_{zt5}	Tlaková ztráta v kanálku dna lící pánve	[Pa]
p_{zt6}	Tlaková ztráta v rychlospojce	[Pa]

p_{zt7}	Tlaková ztráta v potrubí pro zátku	[Pa]
p_{zt8}	Tlaková ztráta v rychlospojce	[Pa]
$p_{zt,9}$	Tlaková ztráta v potrubí pro víko	[Pa]
p_{zt10}	Tlaková ztráta v chladicím kanálku víka	[Pa]
p_{zt11}	Tlaková ztráta v chladicím kanálku podávací a hořákové sekce	[Pa]
p_{zt12}	Tlaková ztráta v chladicím kanálku sekce s krystalizátorem	[Pa]
p_{zt13}	Tlaková ztráta třením v hadici pro sekci	[Pa]
p_{zt14}	Tlaková ztráta třením v chladicím okruhu sekce pro tažení a dochlazování	[Pa]
p_{zt15}	Tlaková ztráta v jedné větvi DN 10	[Pa]
$t_{H_2O\ vstup}$	Teplota chladicí vody na vstupu	[°C]
$t_{H_2O\ vystup}$	Teplota chladicí vody na výstupu	[°C]
$t_{H_2O\ vystup;1}$	Teplota chladicí vody na výstupu ze stěny licí pánve	[°C]
$t_{H_2O\ vystup;2}$	Teplota chladicí vody na výstupu ze dna licí pánve	[°C]
$t_{H_2O\ vystup;3}$	Teplota chladicí vody na výstupu ze zátky	[°C]
$t_{H_2O\ vystup;4}$	Teplota chladicí vody na výstupu z víka	[°C]
$t_{H_2O\ vystup;5}$	Teplota chladicí vody na výstupu z podávací a hořákové sekce	[°C]
$t_{H_2O\ vystup;6}$	Teplota chladicí vody na výstupu ze sekce s krystalizátorem	[°C]
$t_{H_2O\ vystup;7}$	Teplota chladicí vody na výstupu ze sekce pro tažení a dochlazování	[°C]
t'_{H_2O}	Průměrná teplota chladicí vody	[°C]
$t'_{H_2O;1}$	Průměrná teplota chladicí vody ve stěně licí pánve	[°C]
$t'_{H_2O;2}$	Průměrná teplota chladicí vody ve dně licí pánve	[°C]
$t'_{H_2O;3}$	Průměrná teplota chladicí vody v zátce	[°C]
$t'_{H_2O;4}$	Průměrná teplota chladicí vody ve víku	[°C]
$t'_{H_2O;5}$	Průměrná teplota chladicí vody v podávací a hořákové sekci	[°C]
$t'_{H_2O;6}$	Průměrná teplota chladicí vody v sekci s krystalizátorem	[°C]
$t'_{H_2O;7}$	Průměrná teplota chladicí vody v sekci pro tažení a dochlazování	[°C]
t_{st}	Teplota stěny chladicího kanálku	[°C]
$t_{stěny}$	Teplota stěny licí pánve	[°C]
t_{Tav}	Teplota přehřáté taveniny pro krystalizátor	[°C]
$t_{Tav;1}$	Teplota přehřáté taveniny pro licí pánve	[°C]
t_{vys}	Teplota na výstupu z krystalizátoru	[°C]
t_1	Výška části pera	[mm]
$v_{pod;1}$	Rychlost podávání polotovaru do místa tavby	[m · s ⁻¹]
v_{pol}	Rychlost podávání polotovaru	[m · s ⁻¹]
$v_{taž}$	Rychlost tažení	[m · s ⁻¹]
w_{H_2O}	Rychlost chladicí vody	[m · s ⁻¹]
$w_{H_2O;1}$	Rychlost chladicí vody v zátce	[m · s ⁻¹]

Δp_{z1}	Místní ztráta v části krystalizátoru	[Pa]
$\Delta p_{z,KR}$	Celková místní ztráta v krystalizátoru	[Pa]
Δt_{H_2O}	Oteplení vody	[°C]
$\Delta t_{H_2O;1}$	Oteplení vody ve stěně licí pánve	[°C]
$\Delta t_{H_2O;2}$	Oteplení vody ve dně licí pánve	[°C]
$\Delta t_{H_2O;3}$	Oteplení vody v zátce	[°C]
$\Delta t_{H_2O;4}$	Oteplení vody ve víku	[°C]
$\Delta t_{H_2O;5}$	Oteplení vody v podávací a hořákové sekci	[°C]
$\Delta t_{H_2O;6}$	Oteplení vody v sekci s krystalizátorem	[°C]
$\Delta t_{H_2O;7}$	Oteplení vody v sekci pro tažení a dochlazování	[°C]
$\sigma_{0;1}$	Napětí v ohybu hřídele	[MPa]
$\sigma_{RED;1}$	Redukované napětí	[MPa]
σ_1	Ohybové napětí svaru	[MPa]
$\sigma_{1;DOV}$	Dovolené ohybové napětí	[MPa]
τ_{DS}	Dovolené napětí ve střihu	[MPa]
τ_s	Napětí ve střihu	[MPa]
τ_1	Napětí v krutu	[MPa]
$\phi_{H\check{c}}$	Tepelný výkon přivedený na horní část krystalizátoru	[W]
ϕ_{CH}	Chladicí výkon	[W]
ϕ_{KR}	Tepelný výkon odvedený stěnou krystalizátoru	[W]
ϕ_{Tav}	Tepelný výkon odvedený taveninou na výstupu	[W]
ϕ_R	Tepelný výkon odvedený zářením	[W]
$\phi_{R;C}$	Radiační tok	[W]
$\phi_{R;C,s}$	Radiační tok stíněný	[W]
$\phi_{R;1}$	Radiační tok od prvního hořáku	[W]
$\phi_{R;1,s}$	Radiační tok od prvního hořáku - stíněný	[W]
$\phi_{R;2}$	Radiační tok od druhého hořáku	[W]
$\phi_{R;2,s}$	Radiační tok od druhého hořáku - stíněný	[W]
$\phi_{R;3}$	Radiační tok od kontislitku	[W]
α_{H_2O}	Součinitel přestupu tepla v krystalizátoru	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
$\alpha_{H_2O;1}$	Součinitel přestupu tepla ve stěně licí pánve	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
$\alpha_{H_2O;2}$	Součinitel přestupu tepla ve stěně licí pánve	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
$\alpha_{H_2O;3}$	Součinitel přestupu tepla v zátce	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
$\alpha_{H_2O;4}$	Součinitel přestupu tepla ve víku	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
$\alpha_{H_2O;5}$	Součinitel přestupu tepla podávací a hořákové sekce	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
$\alpha_{H_2O;6}$	Součinitel přestupu tepla sekce s krystalizátorem	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
$\alpha_{H_2O;7}$	Součinitel přestupu tepla sekce pro tažení a dochlazování	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
α_τ	Převodní součinitel	[-]
ε_c	Celková emisivita	[-]
ε_1	Emisivita titanu	[-]
ε_2	Emisivita pláště pece	[-]
ε_3	Emisivita hliníku	[-]
ξ_1	Místní ztráta oblouku 45°	[-]
ξ_2	Místní ztráta oblouku 90°	[-]
η_{H_2O}	Dynamická viskozita chladicí vody	Pa · s
λ_{H_2O}	Měrná tepelná vodivost chladicí vody	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]

λ_1	Součinitel tření	[–]
λ_2	Součinitel tření	[–]
λ_3	Součinitel tření	[–]
λ_4	Součinitel tření ve stěně lící pánve	[–]
λ_5	Součinitel tření ve dně lící pánve	[–]
λ_6	Součinitel tření v potrubí pro zátku	[–]
λ_7	Součinitel tření v chladicím kanálku víka	[–]
λ_8	Součinitel tření v chladicím kanálku podávací a hořákové sekce	[–]
λ_9	Součinitel tření v chladicím kanálku sekce s krystalizátorem	[–]
λ_{10}	Součinitel tření v chladicím kanálku sekce pro tažení a dochlazování	[–]
ν_{H_2O}	Kinematická viskozita vody	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
π	Ludolfovo číslo	[–]
ρ_{H_2O}	Hustota vody	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_{Ti}	Hustota titanu	$[kg \cdot m^{-3}]$

1 Úvod

Hlavním cílem diplomové práce je kompletní návrh laboratorní plazmové pece. Laboratorní plazmová pec by měla splňovat veškeré požadavky na proces tavení titanu, niklu a jejich slitin. Laboratorní plazmová pec bude navržena z několika sekcí. Každá sekce bude mít svůj předem určený technologický proces. Polotovar musí být podáván do místa tavby, aniž by se porušila ochranná atmosféra uvnitř pece. Sekce pro podávání a hoření musí umožnit podávání i více než jednoho polotovaru do místa tavby - vznik slitin. Vnitřní část pece musí umožňovat všechny technologické postupy udávané v patentu dle zadání. Všechny díly pece budou chlazeny. Chladicí voda bude napojena na společný okruh dle navrženého schématu. Celá pec bude napojena na řídicí systém, který bude ovládat jednotlivé části pece. V případě nebezpečí bude pec zastavena řídicím systémem.

2 Rešerše

2.1 Titan a jeho slitiny

Vlastnosti [1], [2]:

- Nižší hustota oproti ocelím ($\rho = 4.55 \text{ g cm}^{-3}$)
- Vysoká specifická pevnost při 250 – 500 °C, kde už nelze použít Al, Mg
- Vysoká pevnost i při záporných teplotách
- Odolnost proti únavovému namáhání (povrch bez vrubů a rýh)
- Vynikající korozní odolnost (velmi stabilní vrstva oxidu Ti)
- Dobrá tvárnost za studena, u některých slitin superplasticita
- Nízká teplotní roztažnost

Nevýhody:

- Vysoké výrobní náklady => vysoká cena (~8x vyšší než u Al)
- Chemická reaktivita nad 500 °C – intenzivní reakce s O₂, H₂, N₂, s vyzdívkou pecí a materiálem forem => křehké vrstvy, které se musí pracně odstraňovat
- Nižší modul pružnosti oproti oceli ($E = 115 \text{ GPa}$)
- Špatné třecí vlastnosti, sklon k zadírání
- Špatná obrobiteľnosť (nízká teplotní vodivost → místní přehřívání, nalepování na nástroj, nad 1200 °C nebezpečí vznícení třísek a Ti prachu)
- Problémy při svařování (slučivost s atmosférickými plyny => nutnost svařování v ochranné atmosféře, difúzně, laserem)

Použití:

- Letectví, kosmický průmysl, chemický průmysl, vysokopevnostní konstrukce

Rozdělení slitin titanu podle použití

- Slitiny pro tváření
- Slitiny pro odlitky

Příklady slitin titanu

- *Slitiny Ti-Al-V* – nejrozšířenější, Al - pevnost a žárovevnost, V – pevnost i tvárnost, v žíhaném i vytvrzeném stavu, obtížné svařování.
 - Použití – potahy, spojovací části, díly kompresorů, do 450 °C
- *Slitiny Ti-Al-Mo-Si* – žárovevné, lepší creepové vlastnosti, horší svařitelnost a technologické vlastnosti.
 - Použití – oběžné lopatky a disky kompresorů leteckých motorů, do 500 °C.
- *Slitiny Ti-Al-Cr-Mo-Fe-Si* – žíhané nebo vytvrzené
 - Použití – lopatky a disky kompresorů, do 500 °C

- *Slitiny Ti-V-Al-Fe* – kombinace vysoké pevnosti a houževnatosti, silně namáhané díly do 315 °C.
- *Slitiny Ti-V-Cr-Mo-Zr-Al* - nejvyšší pevnost a mez kluzu, svařitelnost, vysokopevnostní silové prvky
- *Slitiny Ti-Al-Cr-Mo-Fe-Si* – žíhané nebo vytvrzené.
 - Použití – lopatky a disky kompresorů, do 500 °C.

2.2 Měď

Vlastnosti [11]:

- Teplota tání 1083 °C
- Hustota ($\rho = 8,96 \text{ g cm}^{-3}$)
- Tepelná vodivost $401 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Modul pružnosti v tahu 130 GPa
- Odolnost proti korozi – působením vzdušné vlhkosti a oxidu uhličitého pokryje povrch tenkou nazelenalou vrstvou uhličitanu měďnatého, který chrání povrch proti korozi

Použití

- Elektrické vodiče
- Trubky ve výměnících tepla
- Tenkovrstvé fotoelektrické články
- Výroba katalyzátorů, umělých vláken

Sloučeniny mědi v přírodě

- Chalkopyrit CuFeS_2
- Bornit (pestrá ruda měděná) Cu_3FeS_3
- Chalkosin (leštěnec měděný) Cu_2S
- Burnonit CuPbSbS_3
- Tenorit CuO

2.3 Nikl

Vlastnosti [11]:

- Lesklý, kujný a tažný kov
- Dobře odolává vodě i vzduchu
- Teplota tání 1453 °C
- Hustota $\rho = 8,908 \text{ g cm}^{-3}$
- Tepelná vodivost $91 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Modul pružnosti v tahu 200 GPa
- Přidáním niklu do oceli ovlivňuje její houževnatost a kujnost

- Ve slitinách s hliníkem, zvyšuje jejich pevnost za vysokých teplot
- Nitinol – superelastická slitina niklu s titanem, používá se v medicíně pro výrobu stentů (tubulárních implantátů) sloužících ke zprůchodnění tělních trubic

Slitiny niklu se dělí:

- Konstrukční
- Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi
- Žárupevné
- Žáruvzdorné

Použití:

- Nitinol – superelastická slitina niklu s titanem, používá se v medicíně pro výrobu stentů (tubulárních implantátů) sloužících ke zprůchodnění tělních trubic
- Slitina 89% niklu a 11% patří mezi kovová skla (amorfni kovy) a používá se jako tvrdá pájka pro pájení ve vesmírné technice

2.4 Ochranné atmosféry

2.4.1 Aktivní plyn [3]

- Aktivní plyn má kromě ochranné funkce (zamezení přístupu vzduchu k roztavenému kovu) také za úkol vstupovat do chemických reakcí svarové lázně. Aktivně se podílí na procesech, které probíhají v roztaveném svarovém kovu.
- Nejčastěji používané plyny a směsi plynů:
 - a. Oxid uhličitý CO_2
 - Velmi populární v malých provozech díky snadné dostupnosti a nízké ceně
 - Použití pro nelegované a nízkolegované oceli
 - Nevhodný pro vysokolegované oceli
 - b. Směs Argon + Oxid uhličitý
 - Podíl oxidu uhličitého ve směsi může být maximálně 25%, při vyšším podílu by byl argon ve směsi zbytečný
 - Použití pro nelegované a nízkolegované oceli
 - c. Směs Argon + Kyslík
 - Podíl kyslíku ve směsi by neměl překročit 5%
 - Použití u vysokolegovaných oceli
 - d. Vícesložkové směsi na bázi argonu
 - Jedná se o směs plynů s více složkami, jako například oxid uhličitý, kyslík, dusík a další.

2.4.2 Inertní plyn [3]

- Inertní plyn má pouze ochrannou funkci spočívající v zamezení přístupu vzduchu k roztavenému kovu. Neúčastní se žádných chemických reakcí v lázni a je tedy k chemickým procesům inertní (netečný).
- Nejčastěji používané plyny a směsi plynů:
 - a. Argon
 - Nejčastěji používaný inertní plyn. Vhodný při tavení hliníkových materiálů, měděných slitin, titanu apod.
 - Technický argon se dodává v několika stupních čistoty, rozdíl mezi jednotlivými stupni je v řádu tisícín procent, ale rozdíl v ceně může být i několik tisíc korun
 - Argon 4,6 (čistota plynu je 99,996%) – použití: hliníkové a měděné materiály
 - Argon 4,8 (čistota plynu je 99,998%)
 - Argon 5,0 (čistota plynu je 99,999%) – použití: Titan
 - b. Směs Argon + Helium
 - Příměs hélia může být až do 95% ve směsi. Hélium ve směsi zvyšuje teplotu.

Kontrola množství kyslíku [9]:

- Slouží pro kontrolu koncentrace kyslíku uvnitř pece
- Bude použit kyslíkový analyzátor OXYMETR GREISINGER GOX 100



Obr. 1 Kyslíkový analyzátor

Kontrola teploty tavení [10]:

Pro daný případ bude použit teploměr IR2C-1000-33-C4EI.

Parametry teploměru:

- Doba odezvy 10 ms
- Přesnost 0,2% z plného rozsahu
- Rozlišení teploty 1°C
- Teplotní rozsah 1000 °C – 3000 °C



Obr. 2 Teploměr IR2C-1000-33-C4EI

2.5 Aktuátory [4]

Aktuátory poskytují bezpečnou, tichou a čistou možnost posouvání či polohování s přesnou kontrolou pohybu. Jsou efektivní a mají dlouhou životnost s prakticky nulovými nároky na údržbu.

Lineární krokový aktuátor:

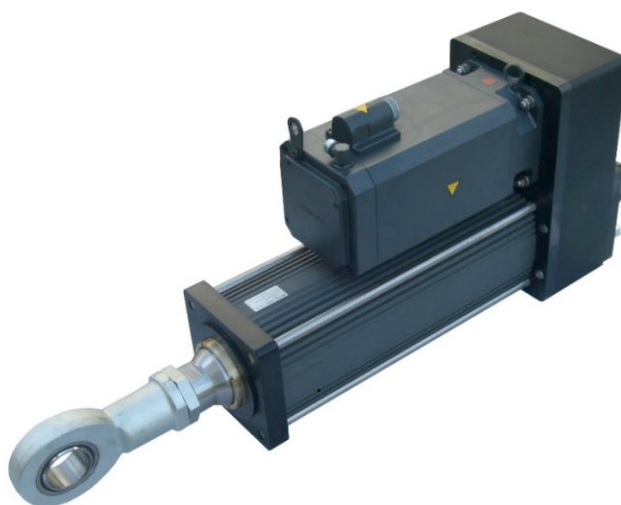
- Parametry
 - Patentované uložení šroubu (nízké tření + dlouhá životnost)
 - Axiální kuličkové ložisko také s dlouhou životností
 - Různé stoupání pohybového šroubu (0,001-0,1mm/krok)
 - Standardní úhel na jeden krok 1,8 stupně
 - Tepelná třída B (130 Celsia)
 - Bezúdržbové provedení
 - 6 velikostí (NEMA 8 to NEMA 34)
 - Různá napětí (2,3V to 12V)



Obr. 3 Lineární krokový aktuátor

Lineární zdvižné servopřevodovky vysokých výkonů:

- Vlastnosti aktuátorů řady FT
 - Válečkový šroub vysouvá teleskopický mechanismus.
 - Navržen tak, aby byl kompatibilní s většinou standardních servomotorů.
 - Připevnění motoru a převodové konfigurace umožňují vyhovět téměř každé aplikaci.
 - Standardní verze nabízí tři různé velikosti se zdvihy od 300mm do 2,5 metru
 - Maximální síly až k 300 kN.
 - Rychlost až 1m/s
 - Vysoké zatížení, delší životnost, může pracovat v kratších cyklech v porovnání s kuličkovým šroubem
 - Přibližně 15x větší životnost než kuličkový šroub
 - Utěsněné pouzdro zabraňuje vniku obrušujících částic a dalších nečistot do kritických mechanismů.
 - Bezproblémový provoz i ve velmi nepříznivých podmínkách.
 - Řada FT je standardně přemazána (Volitelně olejové mazivo).



Obr. 4 Servo aktuátory s válečkovým šroubem

2.6 Rozvod chladicí kapaliny [5]

Hydraulické rychlospojky:

Hydraulické rychlospojky slouží ke snadnému a rychlému spojení nebo rozpojení hydraulického okruhu.

Příklad typu rychlospojek:

- Kuličkové rychlospojky - nejrozšířenější typ rychlospojek
- Šroubovací rychlospojky
- Ekologické rychlospojky
- Rychlospojky s bajonetovým zámkem



Obr. 5 Kuličkové rychlospojky

Armované hydraulické hadice:

Příklad typu hadic:

- Hydraulické hadice pro horké oleje
- Kompaktní hydraulické hadice
- Spirálové hydraulické hadice
- Sací hadice
- Hydraulické hadice vysoce odolné proti abrazi a otěru
- Kompaktní hydraulické hadice pro vysokotlaké čisticí stroje
- Teflonové hadice PTFE pro vysoké teploty
- Termoplastické hydraulické hadice

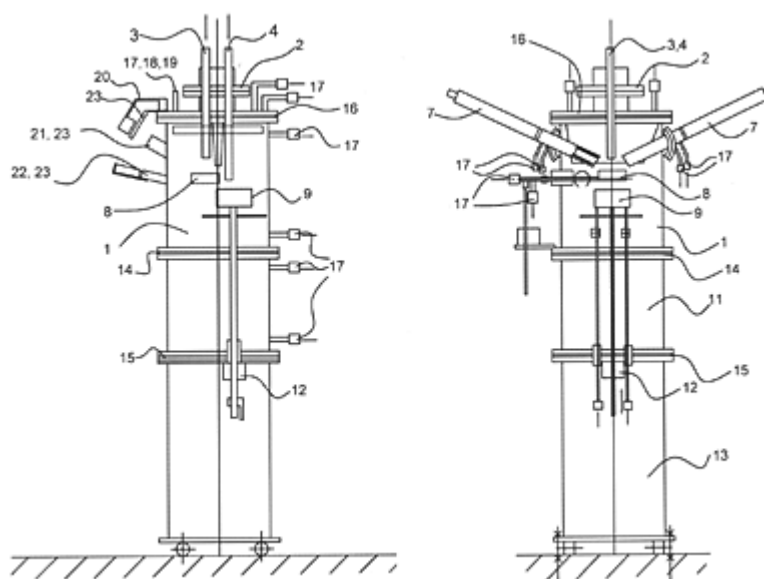


Obr. 6 Hydraulické hadice

2.7 Patentové podklady [25]

Dle zadání vycházím z českého patentového spisu 304 722. Plazmová pec může pracovat několika režimech. Polotovar se může natavovat do měděné, vodou chlazené lící pánve, kde je dále odléván do měděného, rovněž vodou chlazeného krystalizátoru. Dále může pracovat ve variantě přímého tavení polotovaru do krystalizátoru nebo po natavení slitiny do lící pánve její odlévání do kokily.

V plazmové peci se nachází dva hořáky. Jeden slouží k tavení polotovaru do lící pánve. Druhý slouží buď k tavení polotovaru přímo do krystalizátoru, nebo udržování teploty taveniny při odlévání z lící pánve do krystalizátoru nebo kokily.



Obr. 7 Dvouhořáková víceúčelová plazmová pec

2.8 Prostup tepla

2.8.1 Prostup tepla při konvekci [6], [8]

Přestup tepla probíhá při pohybu mezi tekutinou a pevnou látkou – proudící tekutina předává nebo odebírá teplo z povrchu tělesa.

Konvekci lze rozdělit:

- Přirozenou – působení gravitačního pole na nerovnoměrně prohřátou tekutinu
- Nucenou – vnější zásah do tekutiny

Konvekci mezi tekutinou a pevnou látkou lze vyjádřit jako rovnost Newtonova a I. Fourierova zákona:

$$q_{kon.} = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = \alpha_{kon.} \cdot (t_{povrch} - t_{tekutina}) \quad (1.1)$$

Kde:

- $\alpha_{kon.}$ Součinitel prostupu tepla konvekcí a stanoví se z rovnice

$$\alpha_{kon.} = - \frac{\lambda}{t_{povrch} - t_{tekutina}} \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (1.2)$$

Výpočet hodnoty součinitele přestupu tepla se dá stanovit pomocí kritérií

$$Nu = f(Re, Gr, Pr, Fo, Po, \xi_x, \xi_y, \xi_z) \quad (1.3)$$

Kde:

- ξ_x, ξ_y, ξ_z jsou bezrozměrné souřadnice
- Ostatní kritéria lze stanovit podle obr.

2.8.2 Přestup tepla při radiaci (záření) [6], [8]

Sdílení tepla zářením se uskutečňuje elektromagnetickým vlněním, které se šíří rychlostí světla. Množství vysálané energie závisí na teplotě tělesa.

Základní zákony pro sdílení tepla zářením:

- Planckův zákon: „Intenzita vyzařovaného černého tělesa je závislá na vlnové délce. Pro každou teplotu existuje maximum vyzážené energie při vlnové délce“.

$$E_{0,\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} [W \cdot m^{-3}] \quad (1.4)$$

- Kde: $c_1 = 3,7412 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{K}$
- Wienův posuzovací zákon: „S rostoucí teplotou se maximum vyzařené energie posouvá ke kratším vlnovým délkám“. Intenzita vyzařování černého tělesa

$$E_{0,\lambda,max} = 1,286 \cdot 10^{-5} \cdot T^5 [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1.5)$$

- Stefanův – Boltzmannův zákon: „Intenzita vyzařování černého tělesa je úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty“.
 - Intenzita vyzařování černého tělesa

$$E_0 = \sigma \cdot T^4 [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1.6)$$

$$\sigma = \frac{c_1 \cdot \pi^4}{c_2^4 \cdot 15} = \frac{3,7412 \cdot 10^{-16} \cdot \pi^4}{(1,4388 \cdot 10^{-12})^4 \cdot 15} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \quad (1.7)$$

- Pro šedá tělesa platí

$$E = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1.8)$$

- Kde: ε ... Emisivita materiálu

- Lambertův zákon: Popisuje vyzařování energie do jednotlivých směrů prostoru.
- Kirchhoffův zákon: Popisuje vzájemnou závislost mezi emisivitou ε a pohltivostí těles A .

$$A = \varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{E}{\sigma \cdot T^4} \quad (1.9)$$

Zářivý tok mezi dvěma tělesy, která mají rozdílné teploty povrchů, rozdílné plochy povrchů a rozdílné emisivity:

$$P_{12} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \cdot \varphi_{12} \cdot S_1 [\text{W}] \quad (1.10)$$

Vzorec pro složenou emisivitu má tvar:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (1.11)$$

3 Konstrukční návrh

3.1 Upřesnění zadání

Plazmová pec bude sloužit k přetavení polotovaru z titanu nebo niklu na polotovary nové, buď ze samotného materiálu, zbaveného nechtěných látek v lici pánvi nebo sloučenin obou materiálu. Výsledkem bude nově přetavený materiál o nových vlastnostech pro laboratorní výzkum. Tavba bude probíhat v ochranné atmosféře pece. Teplota stěny pece nesmí přesáhnout dovolené hodnoty. Rozměry pece nesmí přesáhnout rozměry místnosti, ve které bude pec stát. Konstrukční návrh musí splňovat funkce zadané patentem.

3.2 Požadavkový list [7]

Tab. 2 Požadavkový list

Specifikace požadavků	podmínka	přání
Funkce, Účinky a funkční parametry:		
Výkon zdroje 60kW	x	
Doprava materiálu do místa tavení		
Přívod a odvod chladicí kapaliny	x	
- vstupní teplota vody 20°C		
- výstupní teplota vody max. 40°C	x	
Přívod a odvod ochranné atmosféry	x	
Kontrola ochranné atmosféry	x	
Materiál krystalizátoru - měď	x	
Materiál lici pánve - měď	x	
Utěsnění pracovního prostoru	x	
Spojení jednotlivých částí pece		
- přírubové spojení		
Připojení k řídicí jednotce	x	
Provoz:		
Prostředí: laboratoř		
Četnost použití: střední		
Požadovaná živostnost: minimálně 5 let	x	
Údržba		

Ergonomie:		
Vysoká přesnost chodu všech pohyblivých částí	x	
Bezpečnost proti poranění (vysoké teploty uvnitř zařízení)	x	
Možnost kontroly pracovního prostoru (náhledové skla, kamera)	x	
Vzhled:		
Uspokojivé tvary		x
Povrch - odolný vůči vysoké teplotě	x	
- barevně nenápadný		x
Distribuce a manipulace:		
Možnost rozebíratelnosti jednotlivých částí a skladovatelnost	x	
Přemisťování – pomocí jeřábové kočky	x	
Předpisy a normy:		
bez porušení patentových práv	x	
Výroba:		
Kusová výroba		
Ekonomie:		
Využití ztrátového tepla		x

3.3 Kritéria pro hodnocení

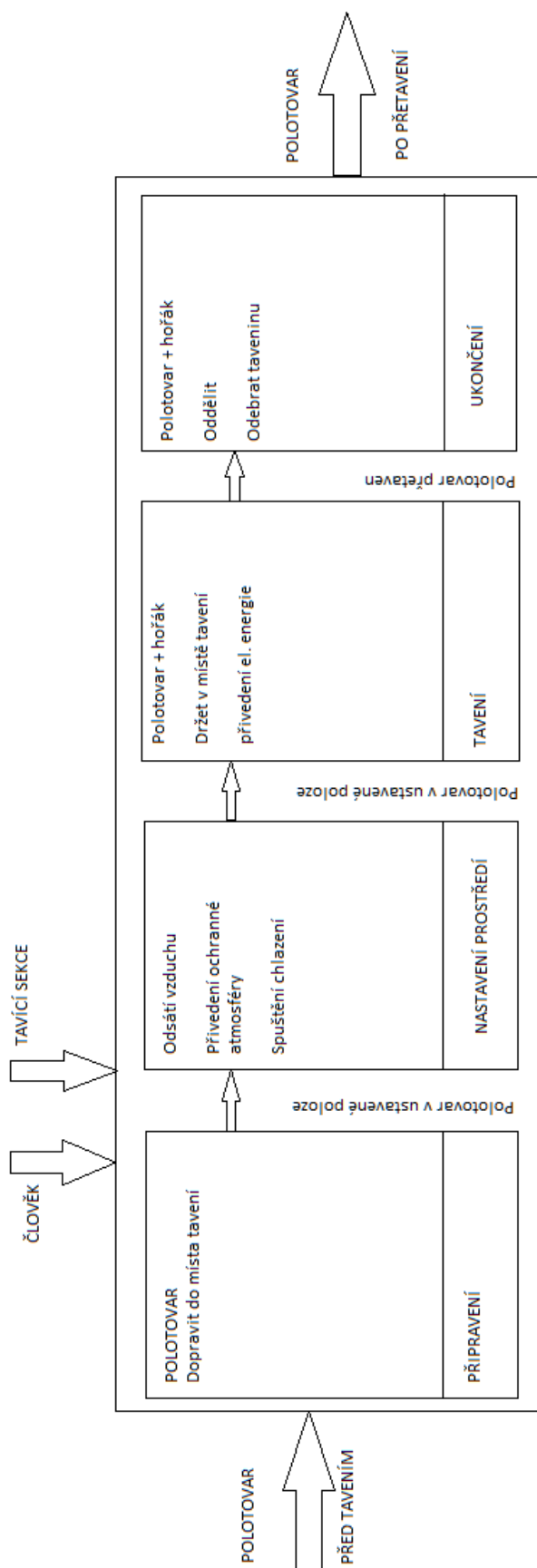
- Vytvoření a udržení ochranné atmosféry, těsnost – 40%
- Přesné ustavení polotovaru do místa tavby – 15%
- Chlazení přetavovaného polotovaru – 30%
- Bezpečnost – 15%

3.4 Transformační schéma [7]

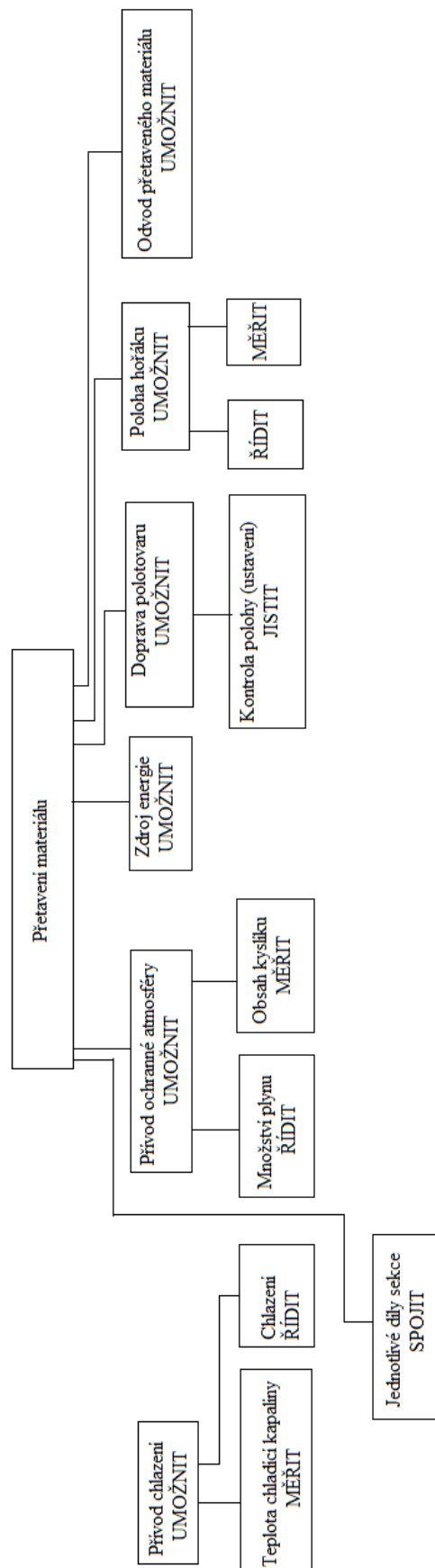


Obr. 8 „Black box“ transformačního schématu

3.5 Funkční struktura [7]

















Obr. 9 Technický proces



Obr. 10 Funkční struktura




3.6 Morfologická matice [7]

Tab. 3 Morfologická matice

Díličí funkce	Funkční principy/orgány - nositelé funkce				
	1. varianta	2. varianta	3. varianta	4. varianta	5. varianta
Obsluha zařízení UMOŽNIT	Člověk 	Počítač  			
Přívod/odvod chlazení UMOŽNIT	Voda  	Vzduch	Olej 		
Teplota povrchu pece MĚŘIT	Bezkontaktně		Kontaktně		
	Infračervený teploměr 	Pyrometr 	Teploměr 		
Teplota chladicí kapaliny MĚŘIT	Elektricky (čidlo)   				
Přívod/odvod ochranné atmosféry UMOŽNIT	Argon  	Oxid uhličitý	Dusík 		
Množství plynu ŘÍDIT	Průtokoměr  	Škrťací ventil 			
Obsah kyslíku MĚŘIT	Kyslíkový analýzátor   				
Zdroj energie UMOŽNIT	střídavé napětí   	stejnoseměrné napětí			
Doprava polotovaru UMOŽNIT	Podavač 	Zásobník  			
Kontrola polohy hořáku JISTIT	Aktuátor (software)  	Doraz	laserová clona 		
Poloha hořáku UMOŽNIT	Aktuátor   	ruční nastavení			
Odvod přetaveného materiálu UMOŽNIT	Člověk 	Robotická ruka  			
Jednotlivé díly pece SPOJIT	Tvarové spojení		Přírubové spojení		Pevné spojení
	Drážkování	Výřezy	Šroub  	čep + závlačka	Svar 

3.7 Orgánová struktura [7]

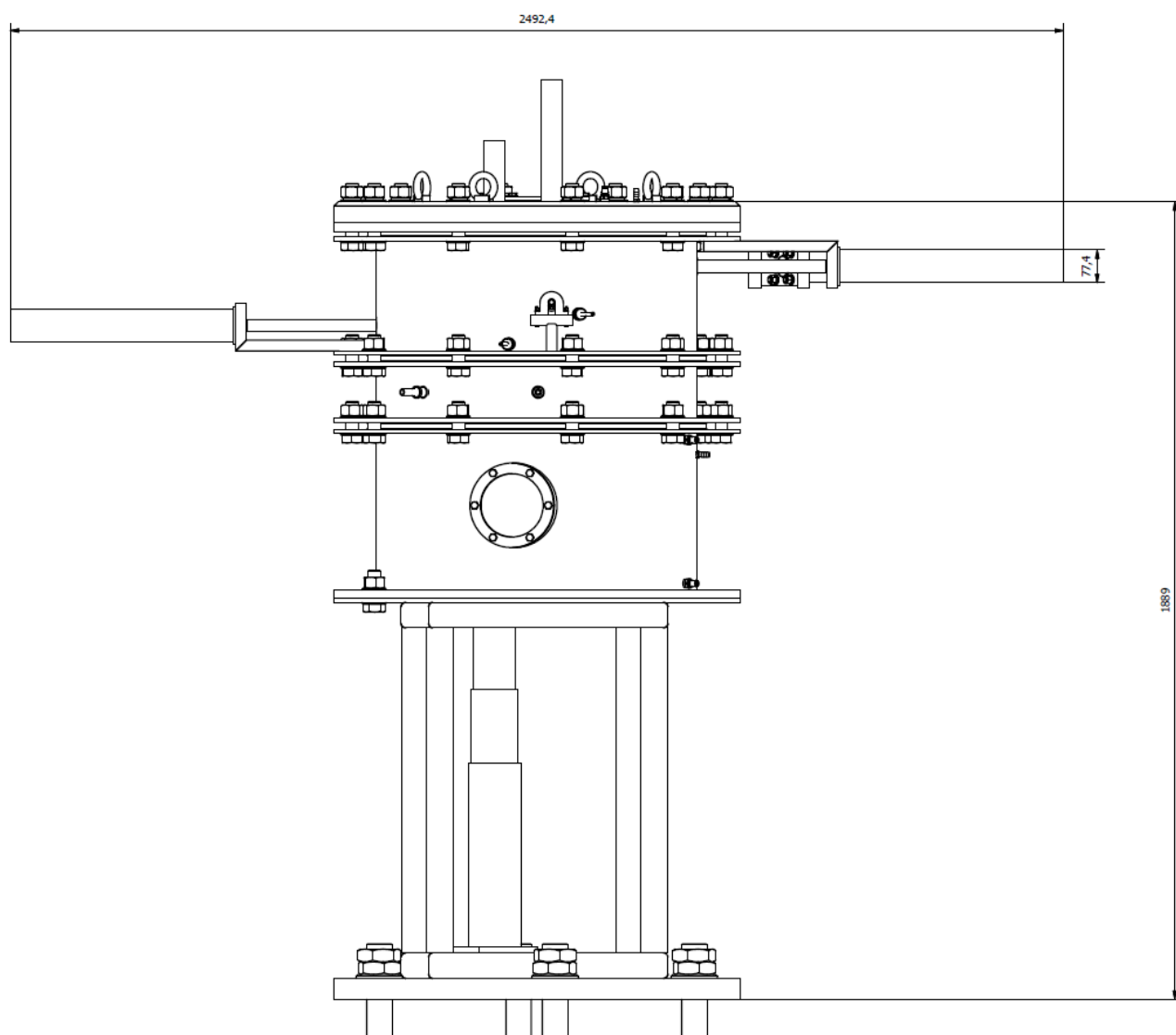
Tab. 4 Orgánová struktura

Kritéria	Váha [%]	1. Koncept 	2. Koncept 	3. Koncept 
Vytvoření a udržení ochranné atmosféry, těsnost	40	2	2	2
Přesné ustavení polotovaru do místa tavby	15	3	2	2
Chlazení přetavovaného polotovaru	30	1	1	3
Bezpečnost	15	1	1	2
Hodnocení		- Nevhodný plyn pro ochrannou atmosféru, drahé manipulační zařízení, nemožnost rozebíratelnosti jednotlivých částí pece		- Nevhodná kapalina pro chlazení, drahé manipulační zařízení, méně přesné snímání teploty povrchu pece
	Náklady	3	2	2
Průměrná známka		2	1,6	2,2
Pořadí		2.	1.	3.

Hodnocení použito jako ve škole:

- 1 – nejlepší
- 5 – nejhorší

3.8 Hrubá stavební struktura

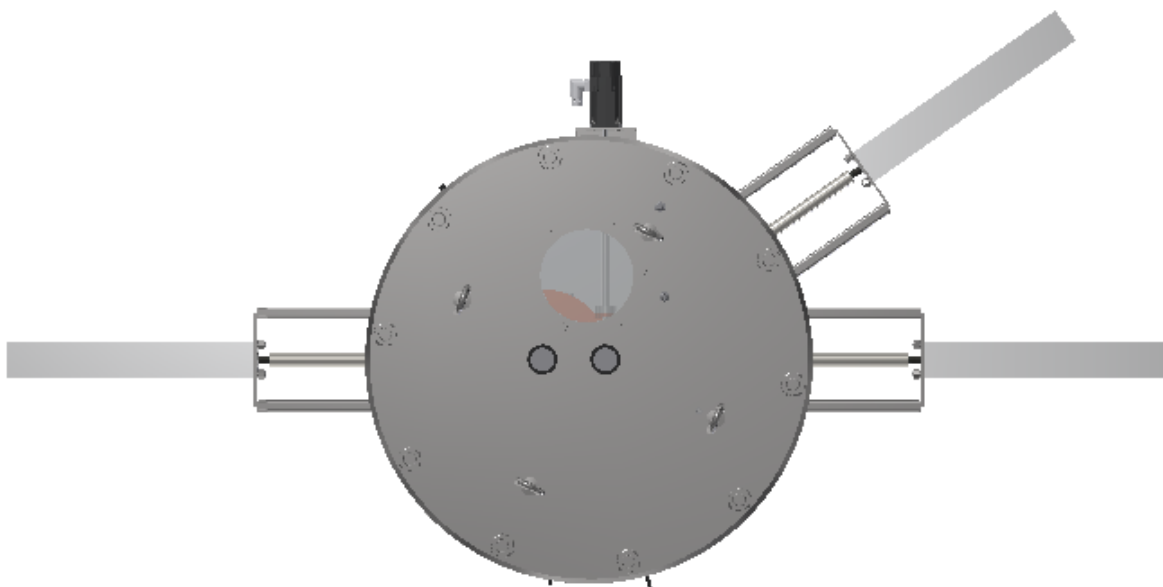


Obr. 11 Hrubá stavební struktura

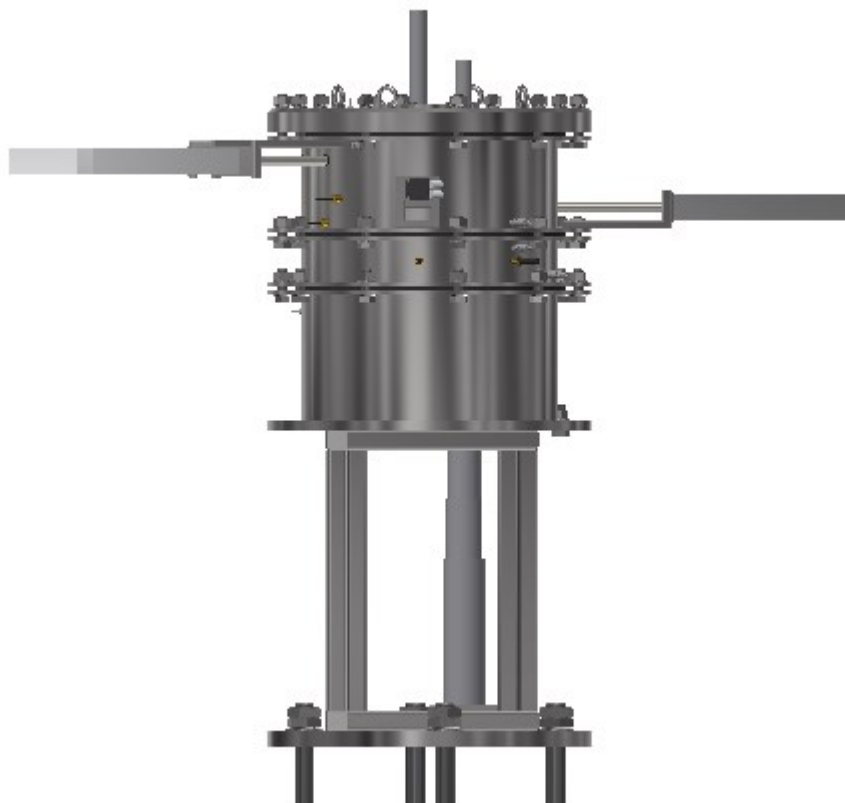
3.9 Úplná stavební struktura



Obr. 12 Úplná stavební struktura - Nárys



Obr. 13 Úplná stavební struktura - Púdorys



Obr. 14 Úplná stavební struktura – zadní pohled

4 Konstrukční návrh jednotlivých částí pece

4.1 Konstrukční návrh krystalizátoru

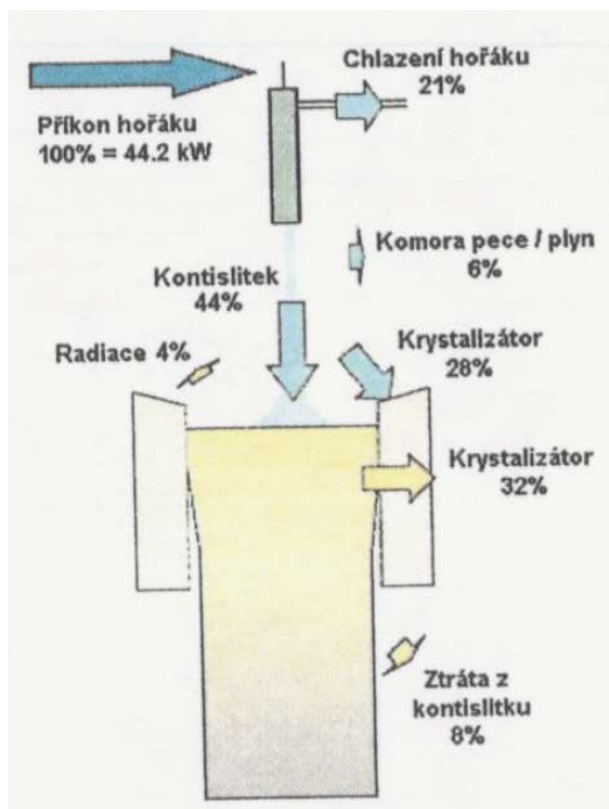
Zadané a zvolené vstupní hodnoty:

- Tavenina – Titan
- Kruhový průřez krystalizátoru $d_{KR} = 35 \text{ mm}$
- Teplota přehřáté taveniny - $t_{Tav} = 1850^\circ\text{C}$
- Teplota taveniny na výstupu z krystalizátoru - $t_{Výs} = 1650^\circ\text{C}$
- Maximální příkon plazmového hořáku $P = 60 \text{ kW}$
- Rychlost tažení taveniny - $v_{taž} = 3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
- Hustota vody $\rho_{H_2O} = 995 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [20]

Plocha průřezu krystalizátoru:

$$S_{KR} = \frac{\pi \cdot d_{KR}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,035^2}{4} = 9,32 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (3.1)$$

Potřebný maximální příkon plazmového hořáku:



Obr. 14 Rozložení odvodu tepelné energie [14]

Při stanovení maximálního potřebného výkonu plazmového hořáku pro daný polotovar vycházím z rozložení tepelné energie do krystalizátoru a okolí obr. 14 [20].

$$P = \frac{\phi_{KR} + \phi_{Tav} + \phi_R}{0,44} [W] \quad (3.2)$$

$$P = \frac{7,2 + 18,7 + 0,321}{0,44}$$

$$P = 59,5 \text{ kW}$$

Tepelný výkon odvedený stěnou krystalizátoru:

$$\phi_{KR} = S_{KR} \cdot v_{taž} \cdot \rho_{Ti} \cdot c_{Ti} \cdot (t_{Tav} - t_{Výs}) + S_{KR} \cdot v_{taž} \cdot \rho_{Ti} \cdot L_{Ti} [W] \quad (3.3)$$

$$\phi_{KR} = 9,32 \cdot 10^{-4} \cdot 0,003 \cdot 4046 \cdot 1002 \cdot (1850 - 1650) + 9,32 \cdot 10^{-4} \cdot 0,003 \cdot 4046 \cdot 436 \cdot 10^3$$

$$\phi_{KR} = 7199 \text{ W} = 7,2 \text{ kW}$$

Tepelný výkon odvedený taveninou na výstupu z krystalizátoru, [14]:

$$\phi_{Tav} = S_{KR} \cdot v_{taž} \cdot \rho_{Ti} \cdot c_{Ti} \cdot t_{Výs} [W] \quad (3.4)$$

$$\phi_{Tav} = 9,32 \cdot 10^{-4} \cdot 0,003 \cdot 4046 \cdot 1002 \cdot 1650$$

$$\phi_{Tav} = 18703 \text{ W} = 18,7 \text{ kW}$$

Tepelný výkon odvedený zářením:

$$\phi_R = \varepsilon_c \cdot C_o \cdot S_{KR} \cdot \left[\left(\frac{T_{Tav}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{Sp}}{100} \right)^4 \right] [W]$$

$$\phi_R = 0,3 \cdot 5,67 \cdot 9,32 \cdot 10^{-4} \cdot \left[\left(\frac{2123,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{333,15}{100} \right)^4 \right]$$

$$\phi_R = 321 = 0,321 \text{ kW}$$

Výpočet celkové emisivity:

Dle [8] se dá vypočíst celková emisivita dvou těles následovně:

$$\varepsilon_c = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_{KR}}{S_{Ok}} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_c = \frac{1}{\frac{1}{0,3} + \frac{9,32 \cdot 10^{-4}}{1,01} \cdot \left(\frac{1}{0,74} - 1 \right)}$$

$$\varepsilon_c = 0,3$$

Dle [19], je emisivita pro jednotlivé materiály:

- Emisivita titanu: $\varepsilon_1 = 0,3$
- Emisivita pláště pece: $\varepsilon_2 = 0,74$

Plocha pece nad krystalizátorem:

$$S_{Ok} = \frac{\pi \cdot d_{pec}^2}{4} + \pi \cdot d_{pec} \cdot l_{pec} \quad (3.6)$$

$$S_{Ok} = \frac{\pi \cdot 0,7^2}{4} + \pi \cdot 0,7 \cdot 0,286$$

$$S_{Ok} = 1,01 \text{ m}^2$$

Tepelný výkon přivedený na horní část krystalizátoru:

Z obr. 14 je patrné, že 28% příkonu hořáku jde do horní části krystalizátoru:

$$\phi_{H\check{c}} = 0,28 \cdot P \text{ [kW]} \quad (3.7)$$

$$\phi_{H\check{c}} = 0,28 \cdot 59,5$$

$$\phi_{H\check{c}} = 16,66 \text{ kW}$$

Požadovaný výkon chladicího systému:

Z obr. 14 jde dále vyčíst, že potřebný chladicí výkon je součtem tepelného výkonu přivedeného na horní část krystalizátoru $\phi_{H\check{c}}$ a tepelného výkonu odvedeného stěnou krystalizátoru ϕ_{KR} .

$$\phi_{CH} = \phi_{H\check{c}} + \phi_{KR} \quad (3.8)$$

$$\phi_{CH} = 16,66 + 7,2$$

$$\phi_{CH} = 23,86 \text{ kW}$$

4.1.1 Návrh chlazení krystalizátoru

$$S_{CH} \geq S_{KR} \quad (3.9)$$

$$i_{CH} \cdot l \cdot (2 \cdot a + b) \geq \pi \cdot d_{KR} \cdot l_{KR}$$

$$i_{CH} \geq \frac{\pi \cdot d_{KR} \cdot l_{KR}}{l \cdot (2 \cdot a + b)}$$

$$i_{CH} \geq \frac{\pi \cdot 35 \cdot 70}{(46,65 \cdot 4) \cdot (2 \cdot 10,31 + 8)} = 1,44 \Rightarrow \text{Volím 2}$$

Stanovení součinitele přestupu tepla dle [16]:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (3.10)$$

Hydraulický průměr kanálku [21]:

$$d_h = \frac{4 \cdot S_v}{o_v} \quad (3.11)$$

$$d_h = \frac{4 \cdot (10,31 \cdot 8)}{2 \cdot 10,31 + 8} = 11,5 \text{ mm} = 0,0115 \text{ m}$$

Reynoldsovo kritérium [21]:

$$Re = \frac{w_{H_2O} \cdot d_h \cdot \rho_{H_2O}}{\eta_{H_2O}} \quad (3.12)$$

$$Re = \frac{3 \cdot 0,0115 \cdot 995}{8,941 \cdot 10^{-4}}$$
$$Re = 38393$$

Měrná teplotní vodivost chladicí vody [14]:

$$a_{H_2O} = \frac{\lambda_{H_2O}}{c_{pH_2O} \cdot \rho_{H_2O}} \quad (3.13)$$

$$a_{H_2O} = \frac{0,602}{4181 \cdot 995}$$
$$a_{H_2O} = 1,45 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Kinematická viskozita vody [21]:

$$\nu_{H_2O} = \frac{\eta_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} \quad (3.14)$$

$$\nu_{H_2O} = \frac{8,941 \cdot 10^{-4}}{995}$$
$$\nu_{H_2O} = 8,956 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandlovo kritérium [14]:

$$Pr = \frac{\nu_{H_2O}}{a_{H_2O}} \quad (3.15)$$

$$Pr = \frac{8,956 \cdot 10^{-7}}{1,45 \cdot 10^{-7}}$$
$$Pr = 6,18$$

Součinitel přestupu tepla[14]:

$$\alpha_{H_2O} = \frac{0,023 \cdot \lambda_{H_2O} \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}}{d_h} \quad (3.16)$$

$$\alpha_{H_2O} = \frac{0,023 \cdot 0,602 \cdot 38393^{0,8} \cdot 6,18^{0,4}}{0,0115}$$

$$\alpha_{H_2O} = 11599,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Stanovení délky chladicího kanálku:

- Průřez chladicího kanálku

$$S_{CH,k} = 10,31 \cdot 8 \quad (3.17)$$

$$S_{CH,k} = 8,25 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

- Oteplení vody [14]

$$\phi_{CH} = i_{CH} \cdot S_{CH,k} \cdot w_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}} \cdot \Delta t_{H_2O} \Rightarrow \Delta t_{H_2O} \quad (3.18)$$

$$\Delta t_{H_2O} = \frac{\phi_{CH}}{i_{CH} \cdot S_{CH,k} \cdot w_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}}}$$

$$\Delta t_{H_2O} = \frac{23860}{2 \cdot 8,25 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot 995 \cdot 4181}$$

$$\Delta t_{H_2O} = 11,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Teplota chladicí vody na výstupu [14]

$$t_{H_2O \text{ vystup}} = t_{H_2O \text{ vstup}} + \Delta t_{H_2O} \quad (3.19)$$

$$t_{H_2O \text{ vystup}} = 20 + 11,5$$

$$t_{H_2O \text{ vystup}} = 31,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Průměrná teplota chladicí vody v obvodu [14]

$$t'_{H_2O} = \frac{t_{H_2O \text{ vstup}} + t_{H_2O \text{ vystup}}}{2} \quad (3.20)$$

$$t'_{H_2O} = \frac{20 + 31,5}{2}$$

$$t'_{H_2O} = 25,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Délka chladicího kanálku

$$\phi_{CH} = \alpha_{H_2O} \cdot i_{CH} \cdot l_{CH} \cdot (2 \cdot a + b) \cdot (t_{st} - t'_{H_2O}) \quad (3.21)$$

Teplota stěny chladicího kanálku krystalizátoru je $t_{st} = 150^\circ C$ dle [13].

Tlak vody v chladicím okruhu krystalizátoru volím $p = 0,5 \text{ MPa}$ dle [14].

Z rovnice (3.21) se vyjádří délka chladicího kanálku krystalizátoru:

$$l_{CH} = \frac{\phi_{CH}}{\alpha_{H_2O} \cdot i_{CH} \cdot (2 \cdot a + b) \cdot (t_{st} - t'_{H_2O})}$$

$$l_{CH} = \frac{23860}{11599,1 \cdot 2 \cdot (2 \cdot 0,01031 + 0,008) \cdot (150 - 25,75)}$$

$$l_{CH} = 0,289 \text{ m} = 289 \text{ mm}$$

Dle výkresové dokumentace vyhovuje délka chladicího kanálku vypočtené minimální hodnotě.

4.1.2 Výpočet třecích a místních ztrát

Tlaková ztráta v potrubí pro krystalizátor [21]:

- Výpočet součinitele tření
 - o $k = 0,01$ [20]

$$\lambda_1 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{Re_{pot.;1}} + \frac{k}{d_{pot.}} \right)^{0,25} \quad (3.22)$$

$$\lambda_1 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{33386} + \frac{0,01}{0,01} \right)^{0,25} = 0,1$$

- Reynoldsovo kritérium pro průtok hadic [21]

$$Re_{pot.;1} = \frac{w_{H_2O} \cdot d_{pot} \cdot \rho_{H_2O}}{\eta_{H_2O}} \quad (3.23)$$

$$Re_{pot.;1} = \frac{3 \cdot 0,01 \cdot 995}{8,941 \cdot 10^{-4}} = 33386$$

- Tlaková ztráta třením [20]

$$p_{zt} = \frac{\lambda_1}{d_{pot.}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot l_{had} \quad (3.24)$$

$$p_{zt} = \frac{0,1}{0,01} \cdot 995 \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 3 = 134325 \text{ Pa}$$

Tlaková ztráta v chladicím kanálku krystalizátoru:

- Výpočet součinitele tření

- $k_1 = 0,015$ [20]

$$\lambda_2 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{Re} + \frac{k_1}{d_h} \right)^{0,25} \quad (3.25)$$

$$\lambda_2 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{38393} + \frac{0,015}{0,0115} \right)^{0,25} = 0,107$$

- Tlaková ztráta třením [20]

- Celková délka jednoho chladicího okruhu krystalizátoru je vypočtena jako součet dílčích délek chladicího kanálku, $l_{kan.} = 685,8 \text{ mm}$

$$p_{zt_1} = \frac{\lambda_2}{d_h} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot l_{kan.} \quad (3.26)$$

$$p_{zt_1} = \frac{0,107}{0,0115} \cdot 995 \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 0,6858 = 28570,6 \text{ Pa}$$

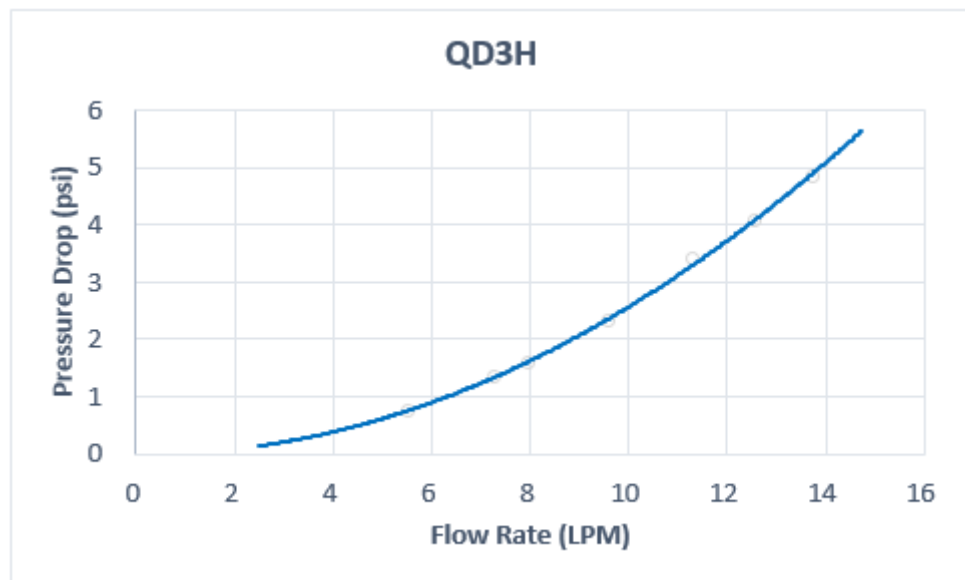
- Celková tlaková ztráta třením v krystalizátoru

$$p_{zt} = p_{zt_1} \cdot 2 = 28570,6 \cdot 2 = 57141,2 \text{ Pa} \quad (3.27)$$

- Tlaková ztráta v rychlospojce [15]

- Průtok rychlospojkou bude přibližně 14 l/min , dle grafu na obr. 15 dodaného výrobcem rychlospojek. Takovému průtoku odpovídá tlaková ztráta $5,1 \text{ psi} \doteq 35163 \text{ Pa}$

$$p_{zt_2} = 35163 \text{ Pa} \quad (3.28)$$



Obr. 15 Diagram závislosti průtoku na tlakové ztrátě [15]

Místní ztráty v krystalizátoru [20]:

- Výpočet místní ztráty v jednom chladicím okruhu krystalizátoru

$$\Delta p_{z_1} = \sum_{i=1}^{n=14} \xi_i \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot \rho_{H_2O} \quad (3.29)$$

- Složení jednoho chladicího okruhu krystalizátoru
 - o 8x oblouk 45° - $\xi_1 = 0,25$
 - o 6x oblouk 90° - $\xi_2 = 0,4$

$$\Delta p_{z_1} = (8 \cdot 0,25 + 6 \cdot 0,4) \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 995 = 19701 \text{ Pa}$$

- Celková místní ztráta v krystalizátoru

$$\Delta p_{z,KR} = 2 \cdot \Delta p_{z_1} \quad (3.30)$$

$$\Delta p_{z,KR} = 2 \cdot 19701 = 39402 \text{ Pa}$$

4.2 Konstrukční návrh lící pánve

Zvolené a zadané hodnoty:

- Tavenina – Titan, slitiny titanu
- Teplota přehřáté taveniny $t_{Tav;1} = 1850\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Maximální příkon plazmového hořáku $P = 60\text{ kW}$

4.2.1 Stanovení chladicího výkonu [14]

Rychlost podávání polotovaru do místa tavby u lící pánve bude $v_{pod;1} = 0,002\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$P_1 = S_{pol} \cdot v_{pod;1} \cdot \rho_{Ti} \cdot c_{Ti} \cdot (t_{Tav;1} - t_{stěny}) + S_{pol} \cdot v_{pod;1} \cdot \rho_{Ti} \cdot L_{Ti} \quad (3.31)$$

$$P_1 = 7,068 \cdot 10^{-4} \cdot 0,002 \cdot 4046 \cdot 1002 \cdot (1850 - 1000) + 7,068 \cdot 10^{-4} \cdot 0,002 \cdot 4046 \cdot 436 \cdot 10^3$$

$$P_1 = 7365,64\text{ W}$$

Při plném výkonu plazmového hořáku bude na horní část lící pánve působit, dle obr. 14, 28% výkonu plazmového hořáku

$$P_{Hčlp} = 0,28 \cdot P \quad (3.32)$$

$$P_{Hčlp} = 16,8\text{ kW} = 16800\text{ W}$$

Celkový chladicí výkon, který musí chladicí kapalina odvést, bude:

$$P_{CH} = P_1 + P_{Hčlp} \quad (3.33)$$

$$P_{CH} = 7365,64 + 16800 = 24165,64\text{ W}$$

4.2.2 Návrh chlazení lící pánve

1. Stěny lící pánve

- Hydraulický průměr kanálku

$$d_{h;1} = \frac{4 \cdot S_{v;1}}{o_{v;1}} \quad (3.34)$$

$$d_{h;1} = \frac{4 \cdot (10 \cdot 5)}{2 \cdot (10 + 5)} = 6,67\text{ mm} = 0,0067\text{ m}$$

- Reynoldsovo kritérium

$$Re_{slp} = \frac{w_{H_2O} \cdot d_{h,1} \cdot \rho_{H_2O}}{\eta_{H_2O}} \quad (3.35)$$

$$Re_{slp} = \frac{3 \cdot 0,0067 \cdot 995}{8,941 \cdot 10^{-4}}$$

$$Re_{slp} = 29676$$

- Měrná teplotní vodivost chladící vody
 - o Měrná tepelná vodivost vody je převzata ze vzorce (3.13)

$$a_{H_2O} = 1,45 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

- Kinematická viskozita vody
 - o Kinematická viskozita vody je převzata ze vzorce (3.14)

$$\nu_{H_2O} = 8,956 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

- Prandlovo kritérium
 - o Prandlovo kritérium pro vodu je převzato ze vzorce (3.15)

$$Pr = 6,18$$

- Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_{H_2O;1} = \frac{0,023 \cdot \lambda_{H_2O} \cdot Re_{slp}^{0,8} \cdot Pr^{0,4}}{d_{h,1}} \quad (3.36)$$

$$\alpha_{H_2O;1} = \frac{0,023 \cdot 0,602 \cdot 29676^{0,8} \cdot 6,18^{0,4}}{0,0067}$$

$$\alpha_{H_2O;1} = 16202,03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

- Stanovení délky chladicího kanálku [14]
 - o Průřez chladicího kanálku

$$S_{CH,k;1} = 0,01 \cdot 0,005 \quad (3.37)$$

$$S_{CH,k;1} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

- Oteplení vody

$$P_{CH} = i_{CH} \cdot S_{CH,k;1} \cdot w_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}} \cdot \Delta t_{H_2O;1} \Rightarrow \Delta t_{H_2O;1} \quad (3.38)$$

$$\Delta t_{H_2O;1} = \frac{P_{CH}}{i_{CH} \cdot S_{CH,k;1} \cdot w_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}}}$$

$$\Delta t_{H_2O;1} = \frac{24165,64}{4 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot 995 \cdot 4181}$$

$$\Delta t_{H_2O;1} = 9,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Teplota chladicí vody na výstupu

$$t_{H_2O \text{ vystup};1} = t_{H_2O \text{ vstup}} + \Delta t_{H_2O;1} \quad (3.39)$$

$$t_{H_2O \text{ vystup};1} = 20 + 9,7$$

$$t_{H_2O \text{ vystup};1} = 29,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Průměrná teplota chladicí vody v obvodu

$$t'_{H_2O;1} = \frac{t_{H_2O \text{ vstup}} + t_{H_2O \text{ vystup};1}}{2} \quad (3.40)$$

$$t'_{H_2O;1} = \frac{20 + 29,7}{2}$$

$$t'_{H_2O;1} = 24,85 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Délka chladicího kanálku

$$P_{CH} = \alpha_{H_2O;1} \cdot i_{CH} \cdot l_{CH;1} \cdot (2 \cdot (a_1 + b_1)) \cdot (t_{st} - t'_{H_2O;1}) \quad (3.41)$$

Teplota stěny chladicího kanálku krystalizátoru je $t_{st} = 150^\circ\text{C}$ dle [13].

Tlak vody v chladicím okruhu krystalizátoru volím $p = 0,5 \text{ MPa}$ dle [14].

Z rovnice (3.41) se vyjádří délka chladicího kanálku krystalizátoru

$$l_{CH} = \frac{P_{KR}}{\alpha_{H_2O;1} \cdot i_{CH} \cdot (2 \cdot (a_1 + b_1)) \cdot (t_{st} - t'_{H_2O;1})}$$

$$l_{CH} = \frac{24165,64}{16202,03 \cdot 4 \cdot (2 \cdot (0,01 + 0,005)) \cdot (150 - 24,85)}$$

$$l_{CH;1} = 0,099 \text{ m} = 99 \text{ mm}$$

Dle výkresové dokumentace vyhovuje délka chladicího kanálku vypočtené minimální hodnotě.

2. Dna lící pánve

- Hydraulický průměr kanálku

$$d_{h;2} = \frac{4 \cdot S_{v;2}}{o_{v;2}} \quad (3.42)$$

$$d_{h;2} = \frac{4 \cdot (7 \cdot 5)}{2 \cdot (7 + 5)} = 5,8 \text{ mm} = 0,0058 \text{ m}$$

- Reynoldsovo kritérium

$$Re_{dlp} = \frac{w_{H_2O} \cdot d_{h;2} \cdot \rho_{H_2O}}{\eta_{H_2O}} \quad (3.43)$$

$$Re_{dlp} = \frac{4 \cdot 0,0058 \cdot 995}{8,941 \cdot 10^{-4}}$$

$$Re_{dlp} = 25818$$

- Měrná teplotní vodivost chladící vody
 - o Měrná tepelná vodivost vody je převzata ze vzorce (3.13)

$$a_{H_2O} = 1,45 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

- Kinematická viskozita vody
 - o Kinematická viskozita vody je převzata ze vzorce (3.14)

$$\nu_{H_2O} = 8,956 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

- Prandlovo kritérium
 - o Prandlovo kritérium pro vodu je převzato ze vzorce (3.15)

$$Pr = 6,18$$

- Součinitel přestupu tepla [14]

$$\alpha_{H_2O;2} = \frac{0,023 \cdot \lambda_{H_2O} \cdot Re_{dlp}^{0,8} \cdot Pr^{0,4}}{d_{h;2}} \quad (3.44)$$

$$\alpha_{H_2O;2} = \frac{0,023 \cdot 0,602 \cdot 25818^{0,8} \cdot 6,18^{0,4}}{0,0058}$$

$$\alpha_{H_2O;1} = 16742,87 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

- Stanovení délky chladicího kanálku [14]

- Průřez chladicího kanálku

$$S_{CH,k;2} = 0,007 \cdot 0,005 \quad (3.45)$$

$$S_{CH,k;2} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

- Oteplení vody

$$P_{CH} = i_{CH} \cdot S_{CH,k;2} \cdot w_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}} \cdot \Delta t_{H_2O;2} \Rightarrow \Delta t_{H_2O;2} \quad (3.46)$$

$$\Delta t_{H_2O;2} = \frac{P_{CH}}{i_{CH} \cdot S_{CH,k;1} \cdot w_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}}}$$

$$\Delta t_{H_2O;2} = \frac{24165,64}{5 \cdot 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 995 \cdot 4181}$$

$$\Delta t_{H_2O;2} = 8,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Teplota chladicí vody na výstupu

$$t_{H_2O \text{ vystup};2} = t_{H_2O \text{ vstup}} + \Delta t_{H_2O;2} \quad (3.47)$$

$$t_{H_2O \text{ vystup};2} = 20 + 8,3$$

$$t_{H_2O \text{ vystup};2} = 28,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Průměrná teplota chladicí vody v obvodu

$$t'_{H_2O;2} = \frac{t_{H_2O \text{ vstup}} + t_{H_2O \text{ vystup};2}}{2} \quad (3.48)$$

$$t'_{H_2O;2} = \frac{20 + 28,3}{2}$$

$$t'_{H_2O;2} = 24,15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Délka chladicího kanálku

$$P_{CH} = \alpha_{H_2O;2} \cdot i_{CH} \cdot l_{CH;2} \cdot (2 \cdot (a_2 + b_2)) \cdot (t_{st} - t'_{H_2O;2}) \quad (3.49)$$

Teplota stěny chladicího kanálku krystalizátoru je $t_{st} = 150^\circ\text{C}$ dle [13].

Tlak vody v chladicím okruhu krystalizátoru volím $p = 0,5 \text{ MPa}$ dle [14].

Z rovnice (3.49) se vyjádří délka chladicího kanálku krystalizátoru

$$l_{CH;2} = \frac{P_{KR}}{\alpha_{H_2O;2} \cdot i_{CH} \cdot (2 \cdot (a_2 + b_2)) \cdot (t_{st} - t'_{H_2O;2})}$$

$$l_{CH;2} = \frac{24165,64}{16742,87 \cdot 5 \cdot (2 \cdot (0,007 + 0,005)) \cdot (150 - 24,15)}$$

$$l_{CH;2} = 0,096 \text{ m} = 96 \text{ mm}$$

Dle výkresové dokumentace vyhovuje délka chladicího kanálku vypočtené minimální hodnotě.

4.2.3 Výpočet třecích a místních ztrát

Tlaková ztráta v potrubí pro stěnu lici pánve:

- Výpočet součinitele tření [21]
 - o $k - 0,01$ [20]

$$\lambda_3 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{Re_{pot;2}} + \frac{k}{d_{pot;1}} \right)^{0,25} \quad (3.50)$$

$$\lambda_3 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{13354} + \frac{0,01}{0,004} \right)^{0,25} = 0,126$$

- Reynoldsovo kritérium pro průtok hadicí [21]

$$Re_{pot;2} = \frac{w_{H_2O} \cdot d_{pot;1} \cdot \rho_{H_2O}}{\eta_{H_2O}} \quad (3.51)$$

$$Re_{pot;2} = \frac{3 \cdot 0,004 \cdot 995}{8,941 \cdot 10^{-4}} = 13354$$

- Tlaková ztráta třením [21]

$$p_{zt;3} = \frac{\lambda_3}{d_{pot;1}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot l_{had;1} \quad (3.52)$$

$$p_{zt;3} = \frac{0,126}{0,004} \cdot 995 \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 3 = 423123,8 \text{ Pa}$$

Tlaková ztráta v chladicím kanálku ve stěně lící pánve:

- Výpočet součinitele tření [21]
 - $k_1 = 0,015$ [20]

$$\lambda_4 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{Re_{slp}} + \frac{k_1}{d_{h;1}} \right)^{0,25} \quad (3.53)$$

$$\lambda_4 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{29676} + \frac{0,015}{0,0067} \right)^{0,25} = 0,122$$

- Tlaková ztráta třením [21]

- Celková délka chladicího okruhu $l_{kan;1} = 1,76 \text{ m}$

$$p_{zt4} = \frac{\lambda_4}{d_{h;1}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot l_{kan;1} \quad (3.54)$$

$$p_{zt4} = \frac{0,122}{0,0067} \cdot 995 \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 1,76 = 143493,9 \text{ Pa}$$

Tlaková ztráta v chladicím kanálku ve dně lící pánve:

- Výpočet součinitele tření [21]
 - $k_1 = 0,015$ [20]

$$\lambda_5 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{Re_{dlp}} + \frac{k_1}{d_{h;2}} \right)^{0,25} \quad (3.55)$$

$$\lambda_5 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{25818} + \frac{0,015}{0,0058} \right)^{0,25} = 0,127$$

- Tlaková ztráta třením [21]

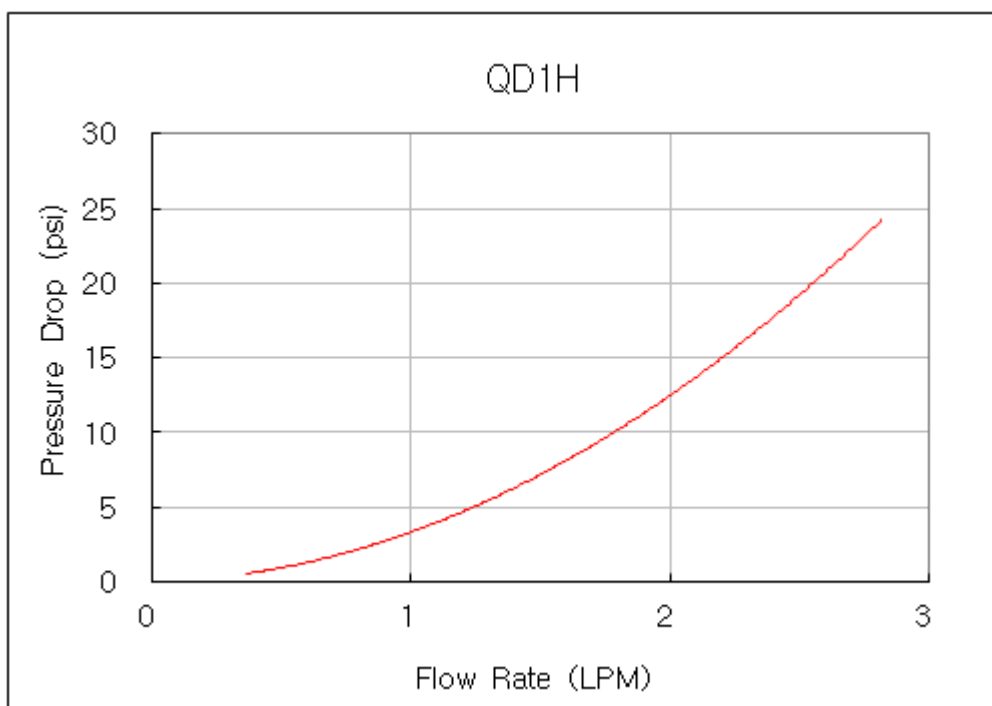
- Celková délka chladicího okruhu $l_{kan;2} = 1,415 \text{ m}$

$$p_{zt5} = \frac{\lambda_5}{d_{h;2}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot l_{kan;2} \quad (3.56)$$

$$p_{zt5} = \frac{0,127}{0,0058} \cdot 995 \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 1,415 = 133267,9 \text{ Pa}$$

- Tlaková ztráta v rychlospojce [15]
 - Průtok rychlospojkou bude přibližně 1.272 l/min . Dle grafu na obr. 16 dodaného výrobcem rychlospojek odpovídá takovému průtoku tlaková ztráta $4 \text{ psi} \doteq 27579 \text{ Pa}$

$$p_{zt_6} = 35163 \text{ Pa} \quad (3.55)$$



Obr. 16 graf závislosti průtoku na tlakové ztrátě [15]

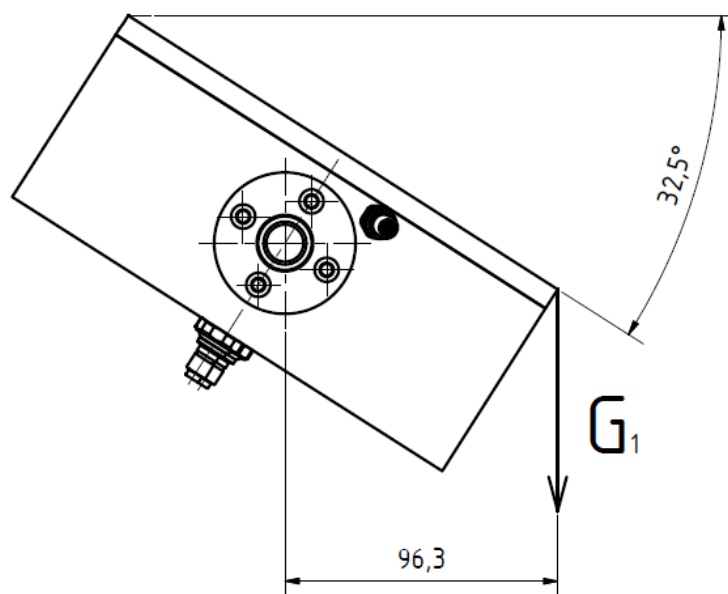
4.2.4 Návrh výklopného mechanismu licí pánve

Polotovar pro hřídel: **KR55 ČSN 42 5510.12** z materiálu **E 335 (1.0060)** dle **EN 10025**

- Vlastnosti vybrané oceli:
 - Mez kluzu $R_{e,min} = 325 \text{ MPa}$

Stanovení krouticího momentu:

- Zatěžující síla je považována za tíhovou sílu taveniny při odlévání do krystalizátoru. Velikost zatěžující síly je odhadována jako tíha kapaliny v momentě těsně před vylitím taveniny z licí pánve, viz obr. 17. Jedná se o předběžný výpočet pro návrh vhodného servomotoru. Volený úhel je stanoven jako extrém, kdy je tavenina ještě v pánvi, těsně před odléváním.



Obr. 17 Rozložení sil na licí pánvi

$$G_1 = m_{tav} \cdot g = 2 \cdot 9,81 = 19,62 \text{ N} \quad (3.56)$$

$$M_{k;1} = G_1 \cdot 96,3 = 19,62 \cdot 96,3 = 1889,4 \text{ Nmm} = 1,89 \text{ Nm} \quad (3.57)$$

Volím servomotor: **AKM31X-ACC2R-01** [22]

Typ	AKM1	AKM2	AKM3	AKM4	AKM5	AKM6	AKM7	AKM8
Velikost	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4	2,3,4,5	2,3,4	2,3,4
Vinutí	B,C,D,E	C,D,E F,G	C,D,E,H	C,E,G H,J,K	E,G,K L,M,N	G,K,L M,N,P	K,L,M,P	T
Max napětí (VDC)	320	640	640	640	640	640	640	640
Nominální moment (Nm)	0.409	1.4	2.88	6.0	14.1	25.0	53.0	140
Max krouticí moment (Nm)	1.46	4.82	10.22	20.4	38.4	65.2	143	668
Rychlost (ot/min)	8000	8000	7000	6000	6000	6000	3500	3000
Max výkon (kW)	0.30	0.54	1.19	1.73	3.87	6.16	7.71	19.5

Obr. 18 Parametry servomotoru [22]

Stanovení ohybového momentu:

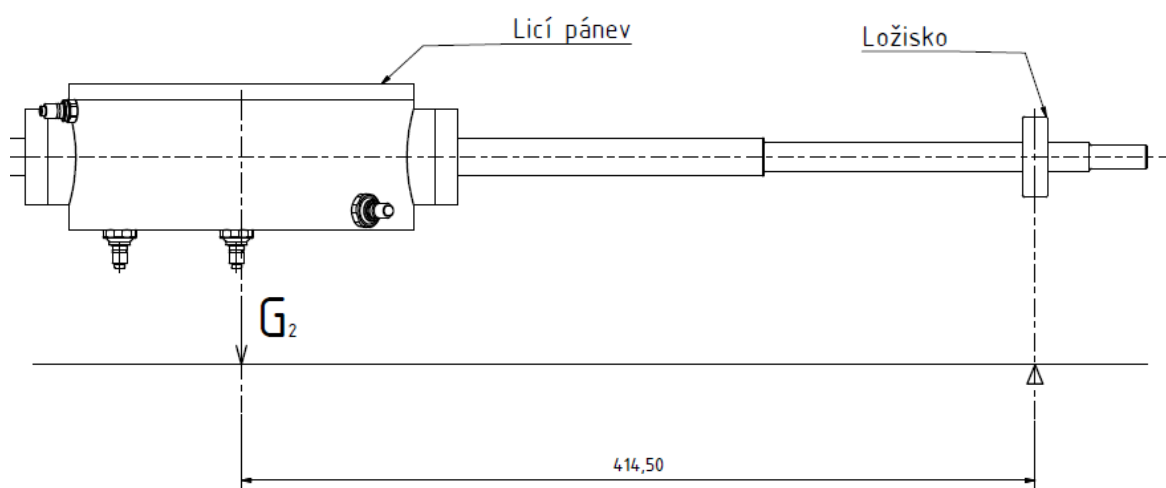
Na hřídel působí polovina tíhy plné lící pánve při tavení. Hmotnost plné lící pánve je součet jednotlivých částí lící pánve, chladicí vody v okruhu a také hmotnosti taveniny uvnitř lící pánve $m_2 \cong 12 \text{ kg}$.

Zatěžující síla:

$$G_2 = \frac{m_2}{2} \cdot g = \frac{12}{2} \cdot 9,81 = 58,9 \text{ N} \quad (3.58)$$

Ohybový moment působící od zatěžující síly do podpor (ložisek):

$$M_{o;1} = G_2 \cdot 414,5 = 58,9 \cdot 414,5 = 24414,05 \text{ Nmm} \quad (3.59)$$



Obr. 19 Zobrazení zatěžující síly na výpočtový model

Kontrola otočné hřídele:

- Kontrola na krut [23]

$$\tau_1 = \frac{M_{k;1}}{W_{k;1}} \quad (3.60)$$

$$\tau_1 = \frac{M_{k;1}}{\frac{\pi \cdot d_1^3}{16}} = \frac{1889,4}{\frac{\pi \cdot 12^3}{16}} = 66,82 \text{ MPa}$$

- Kontrola na ohyb [23]

$$\sigma_{0;1} = \frac{M_{o;1}}{W_{o;1}} \quad [MPa] \quad (3.61)$$

$$\sigma_{0;1} = \frac{M_{o;1}}{\frac{\pi \cdot d_1^3}{32}} = \frac{24414,05}{\frac{\pi \cdot 12^3}{32}} = 143,9 \text{ MPa}$$

- Na hřídel působí kombinované namáhání ohybu a krutu, proto se bude vycházet z HMM hypotézy. Redukované napětí se spočítá [23]:
 - Pro HMM hypotézu platí: $\alpha_1 = \sqrt{3}$ [18].

$$\sigma_{RED;1} = \sqrt{\sigma_{0;1}^2 + (\alpha_1 \cdot \tau_1)^2} \quad [MPa] \quad (3.62)$$

$$\sigma_{RED;1} = \sqrt{143,9^2 + (\sqrt{3} \cdot 66,82)^2} = 184,67 \text{ MPa}$$

- Pevnostní podmínka [23]:
 - Statická bezpečnost $k_s = 1,5$

$$\sigma_{RED;1} \leq \frac{R_{e,min}}{k_s} \quad (3.63)$$

$$184,67 \text{ MPa} \leq \frac{325}{1,5} \text{ MPa}$$

$$184,67 \text{ MPa} \leq 216 \text{ MPa} \dots \text{Vyhovuje}$$

Krouticí moment ze servomotoru na otočnou hřídel bude proveden pomocí těsného pera.

Návrh těsného pera [23]:

- Kontrola pera na otlačení
 - Přímá délka boku pera:

$$l' \geq \frac{F_2}{p_{D2} \cdot t_1} = \frac{277,85}{100 \cdot 1,6} = 1,73 \text{ mm} \quad (3.64)$$

- Zatěžující síla:

$$F_2 = \frac{M_{k;1}}{\frac{d_1}{2} + \frac{t_1}{2}} = \frac{1889,4}{\frac{12}{2} + \frac{1,6}{2}} = 277,85 \text{ N} \quad (3.65)$$

- Délka pera:

$$l_{pera} = l' + b_{pera} = 1,73 + 4 = 5,73 \text{ mm} \quad (3.66)$$

Volím: **PERO 4e7 x 4 x 10 ČSN 02 2562**

- Kontrola na střih [23]:
 - Střížná síla

$$F_3 = \frac{M_{k;1}}{\frac{d_1}{2}} = \frac{1889,4}{\frac{12}{2}} = 314,9 \text{ N} \quad (3.67)$$

- Napětí ve střihu

$$\tau_s = \frac{F_3}{l \cdot b} = \frac{314,9}{10 \cdot 4} = 7,87 \text{ MPa} \quad (3.68)$$

- Dovolené napětí ve střihu [23]:

$$\tau_{DS} = 30 \text{ MPa}$$

- Pevnostní podmínka

$$\tau_s \leq \tau_{DS} \quad (3.69)$$

$$7,87 \text{ MPa} \leq 30 \text{ MPa} \dots \text{Vyhovuje}$$

Ložisko použité při naklápění bude – **Kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem 7302/W64**.

4.3 Konstrukční návrh podavače, rámu podavače

Rám bude tvořen dutými profily se čtvercovým průřezem **25x3 ČSN EN 10219 – 2** z materiálu S235JRH (1.0039) dle EN 10219-1 [17]. Čelo rámu bude vyrobeno z ocelové tyče ploché **100x8 ČSN EN 10058** z materiálu S235JR (1.0038) dle EN 10025-2.

Kontrola svaru v místě napojení rámu na vnější plášť pece [23]:

Rám aktuátoru bude k plášti pece přivařen koutovým svarem velikosti $a = 10 \text{ mm}$, délka koutového svaru na jedné straně je $l = 70 \text{ mm}$.

Vstupní podmínky pro výpočet:

- Svar je zatěžován ohybovým napětím
- Minimální mez kluzu materiálu $R_{e1} = 235 \text{ MPa}$
- Statickou bezpečnost volím $k_s = 2$
- Převodní součinitel dle [18] $\alpha_\tau = 0,65$

Výpočet ohybového napětí:

$$\sigma_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n=2} Mo_i}{W_o} = \frac{Mo_1 + Mo_2}{2 \cdot \frac{a_{svaru} \cdot l_{svaru}^2}{6}} \quad [MPa] \quad (3.70)$$

$$\sigma_1 = \frac{98,1 \cdot 581,95 + 1,85 \cdot 305}{2 \cdot \frac{10 \cdot 70^2}{6}} = 3,52 \text{ MPa}$$

Dovolené napětí:

$$\sigma_{1;DOV} = \alpha_\tau \cdot \frac{R_{e1}}{k_s} \quad [MPa] \quad (3.71)$$

$$\sigma_{1;DOV} = 0,65 \cdot \frac{235}{2} = 76,4 \text{ MPa}$$

Pevnostní podmínka:

$$\sigma_1 \leq \sigma_{1;DOV} \quad (3.72)$$

$$3,52 \text{ MPa} \leq 76,4 \text{ MPa} \dots \text{Vyhovuje}$$

Volba aktuátoru [4]:

Při výpočtu rychlosti podávání polotovaru do místa tavby je vycházeno z rovnice kontinuity:

$$S_{pol} \cdot v_{pol} = S_{KR} \cdot v_{taž} \quad (3.72)$$

$$v_{pol} = \frac{S_{KR} \cdot v_{taž}}{S_{pol}}$$

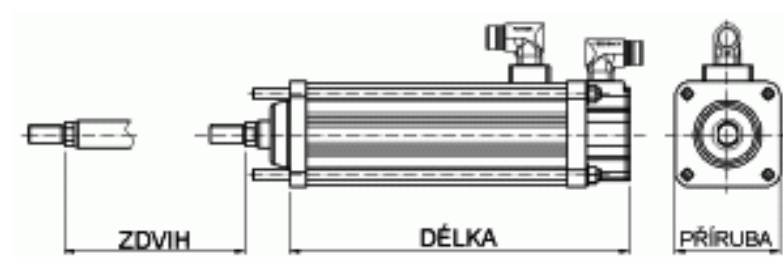
$$v_{pol} = \frac{\frac{\pi \cdot d_{KR}^2}{4} \cdot v_{taž}}{\frac{\pi \cdot d_{pol}^2}{4}} = \frac{\frac{\pi \cdot 0,035^2}{4} \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{\frac{\pi \cdot 0,03^2}{4}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost podávání polotovaru do místa tavby bude $4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a průměr polotovaru bude $d_{pol} = 0,03 \text{ m} = 30 \text{ mm}$ z materiálu 3.7035 [12].

Podávání polotovaru do místa tavby zajistí aktuátor – GSM30-1201 [4].

Tab. 5 Parametry aktuátoru GSM30 – 1201 [4]

Název	Rozměr příruby [mm]	Zdvih [mm]	Stoupání šroubu [mm]	Jmenovitá síla [N]	Maximální rychlost [mm/sec]	Maximální statické zatížení [N]	Hmotnost [kg]
GSM30-1201	84	305	2,54	3688/5992	127	7206	10



Obr. 20 Aktuátor GSM30-1201 [4]

4.4 Konstrukční návrh tažení kontislitku



Obr. 21 Rám se zvedacím sloupkem

Tažení kontislitku bude realizováno pomocí měděné, vodou chlazené zátky, našroubované na ocelovém táhle. Uvnitř táhla bude přivedena chladicí kapalina do zátky a zároveň bude přenášet přímočarý pohyb ze zvedacího sloupku. Soustava, zátka a táhlo, bude vedeno v ose krystalizátoru.

Přímocharý pohyb bude vyvozen zvedacím sloupkem TL8-400350-2032 [22].

Přívod chladicí vody k táhlu zátky bude proveden pomocí rychlospojek QD1H Series dle [15]. Propojení mezi rychlospojkami a zásobníkem bude provedeno pomocí hadice HOS – HSHJ10 di 4 x 8.

Na zátku bude přivedena anoda, která zajistí ve spojení s hořákem zapálení a hoření oblouku při tavení slitiny.

Výsledný kontislitek bude dlouhý 150 mm a bude dochlazován v části pece určené k tažení a dochlazování kontislitku na požadovanou teplotu.



Obr. 22 Táhlo s měděnou zátkou

4.4.1 Návrh chlazení zátky

Tab. 6 Výpočet jednotlivých parametrů chladicího systému

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Počet chladicích kanálků	i_{CH}	1	-
Rychlost chladicí vody v obvodu	$w_{H_2O;1}$	5	$m \cdot s^{-1}$
Hydraulický průměr kanálku	$d_{h;3}$	0,006	m
Reynoldsovo kritérium	$Re_{zátka}$	33385,5	-
Měrná teplotní vodivost chladicí vody	a_{H_2O}	$1,45 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Kinematická viskozita vody	ν_{H_2O}	$8,956 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandlovo kritérium	Pr	6,18	-
Součinitel přestupu tepla	$\alpha_{H_2O;3}$	19879,9	$\frac{W \cdot m^{-2}}{K}$
Průřez chladicího kanálku	$S_{CH;k3}$	$2,83 \cdot 10^{-5}$	m^2
Oteplení vody	$\Delta t_{H_2O;3}$	12,5	$^{\circ}C$
Teplota chladicí vody na výstupu	$t_{H_2O_{vystup;3}}$	32,5	$^{\circ}C$
Průměrná teplota chladicí vody v obvodu	$t'_{H_2O;3}$	26,25	$^{\circ}C$

Pro výpočet jednotlivých veličin v tabulce Tab. 6 jsou použity vzorce z kapitoly 3.1.1 návrh chlazení krystalizátoru, čísla vzorů (3.9) až (3.21).

Dle výkresové dokumentace, vyhovuje délka chladicího kanálku minimální vypočtené hodnotě.

4.4.2 Výpočet třecích a místních ztrát

Tlaková ztráta v potrubí pro zátka:

- Výpočet součinitele tření [21]
 - o $k = 0,01$ [20]

$$\lambda_6 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{Re_{pot.;3}} + \frac{k}{d_{pot.;1}} \right)^{0,25} \quad (3.73)$$

$$\lambda_6 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{22257} + \frac{0,01}{0,004} \right)^{0,25} = 0,125$$

- Reynoldsovo kritérium pro průtok hadic [21]

$$Re_{pot,3} = \frac{w_{H_2O} \cdot d_{pot,1} \cdot \rho_{H_2O}}{\eta_{H_2O}} \quad (3.74)$$

$$Re_{pot,3} = \frac{5 \cdot 0,004 \cdot 995}{8,941 \cdot 10^{-4}} = 22257$$

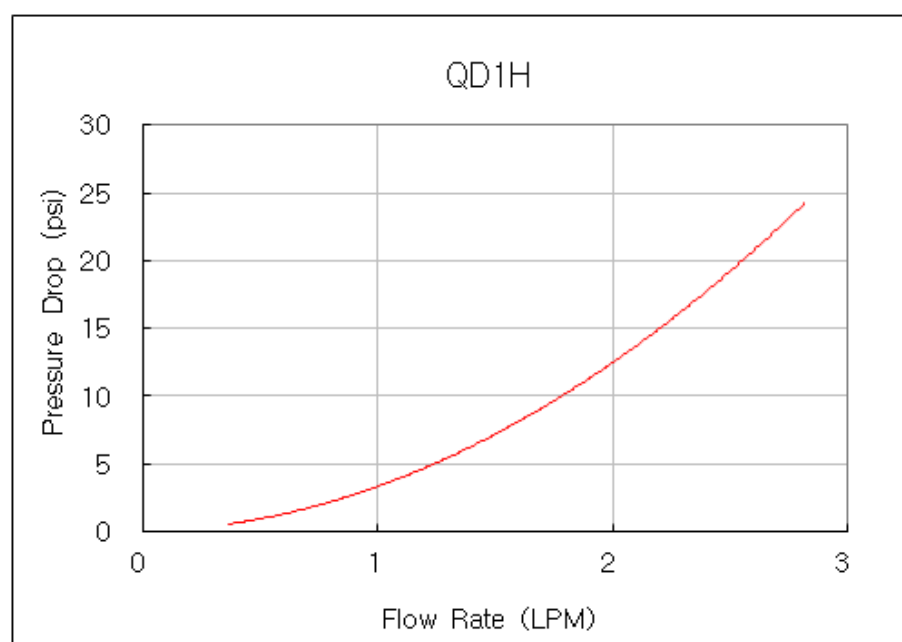
- Tlaková ztráta třením

$$p_{zt_7} = \frac{\lambda_6}{d_{pot,1}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot l_{had,2} [Pa] \quad (3.75)$$

$$p_{zt_7} = \frac{0,126}{0,004} \cdot 995 \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 5 = 705206,3 Pa$$

- Tlaková ztráta v rychlospojce [15]
 - Průtok rychlospojkou bude přibližně 3,7 l/min. Dle grafu na obr. 23 dodaného výrobcem rychlospojek odpovídá takovému průtoku tlaková ztráta 30 psi $\doteq 206842 Pa$

$$p_{zt_8} = 206842 Pa \quad (3.76)$$



Obr. 23 graf závislosti průtoku na tlakové ztrátě [15]

4.5 Konstrukční návrh víka pece:

4.5.1 Návrh chlazení víka

Pro výpočet se uvažuje přibližně stejný radiační tok jako u sekce hořákové a podávací. Radiační tok na víko bude:

$$\phi_{R;C} = 41417 \text{ W}$$

Tab. 7 Výpočet jednotlivých parametrů chladicího systému

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Počet chladicích kanálků	i_{CH}	1	-
Rychlost chladicí vody v obvodu	w_{H_2O}	3	$m \cdot s^{-1}$
Hydraulický průměr kanálku	$d_{h;4}$	0,015	m
Reynoldsovo kritérium	$Re_{víko}$	50078	-
Měrná teplotní vodivost chladicí vody	a_{H_2O}	$1,45 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Kinematická viskozita vody	ν_{H_2O}	$8,956 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandlovo kritérium	Pr	6,18	-
Součinitel přestupu tepla	$\alpha_{H_2O;4}$	10998,8	$\frac{W \cdot m^{-2}}{K}$
Stanovení délky chladicího kanálku	-	-	-
- Průřez chladicího kanálku	$S_{CH;k4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	m^2
- Oteplení vody	$\Delta t_{H_2O;4}$	11,06	$^{\circ}C$
- Teplota chladicí vody na výstupu	$t_{H_2O \text{ vystup};4}$	31,06	$^{\circ}C$
- Průměrná teplota chladicí vody v obvodu	$t'_{H_2O;4}$	25,53	$^{\circ}C$
- Minimální délka chladicího kanálku	$l_{CH;3}$	0,378	m

Pro výpočet jednotlivých veličin v tabulce Tab. 7 jsou použity vzorce z kapitoly 3.1.1 Návrh chlazení krystalizátoru, čísla vzorů (3.9) až (3.21).

Dle výkresové dokumentace vyhovuje délka chladicího kanálku minimální vypočtené hodnotě.

4.5.2 Výpočet třecích a místních ztrát [20], [21]

Tlaková ztráta v potrubí pro podávací a hořákovou sekci:

- Výpočet součinitele tření
 - Součinitel tření, Reynoldsovo kritérium je pro daný případ stejné, jako u výpočtu třecí ztráty v potrubí u krystalizátoru, viz kapitola 3.1.2 Výpočet třecích a místních ztrát.

$$\lambda_1 = 0,1$$

- Tlaková ztráta třením
 - Délka hadice od zásobníku do místa propojení s rychlospojkami je $l_{had;3}$

$$p_{zt;9} = \frac{\lambda_1}{d_{pot.}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot l_{had;3} \quad (3.77)$$

$$p_{zt;9} = \frac{0,1}{0,01} \cdot 995 \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 2 = 89550 \text{ Pa}$$

Tlaková ztráta v chladicím kanálku víka pece

- Výpočet součinitele tření [21]
 - $k_1 = 0,015$ [20]

$$\lambda_7 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{Re_{víko}} + \frac{k_1}{d_{h;4}} \right)^{0,25} \quad (3.78)$$

$$\lambda_7 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{50078} + \frac{0,015}{0,015} \right)^{0,25} = 0,1$$

- Tlaková ztráta třením [21]
 - Celková délka chladicího okruhu $l_{kan;3} = 5,8 \text{ m}$

$$p_{zt10} = \frac{\lambda_7}{d_{h;4}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot l_{kan;3} \quad (3.79)$$

$$p_{zt10} = \frac{0,1}{0,015} \cdot 995 \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 5,8 = 173130 \text{ Pa}$$

- Tlaková ztráta v rychlospojce
 - o Tlaková ztráta v rychlospojce bude stejná jako v případě výpočtu u krystalizátoru, viz kapitola 3.1.2 Výpočet třecích a místních ztrát.

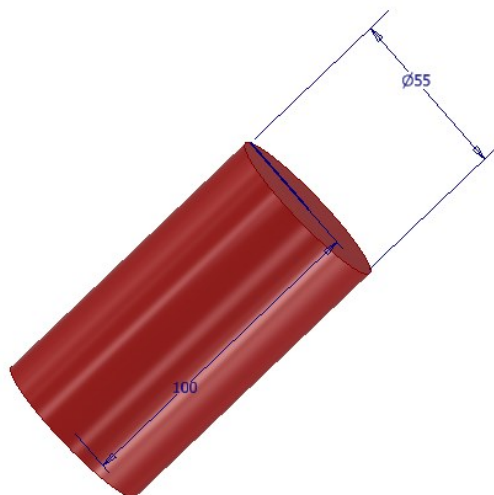
$$p_{zt_2} = 35163 \text{ Pa}$$

4.6 Konstrukce tvaru a chlazení sekce podávací a hořákové:

4.6.1 Stanovení radičního toku

Pro výpočet radičního toku dopadajícího na vnitřní plášť pece se vychází z výpočtového modelu. Proud plazmatu vycházející z plazmového hořáku tvoří kužel dopadající na lící pánev, případně krystalizátor. Při známé výšce a úhlu proudu plazmatu se stanoví střední průměr kužele a vytvoří se výpočtový model o konstantním průřezu, dané výšce a teplotě. Pro výpočet byly stanoveny dva výpočtové modely. Jeden od hořáku pro krystalizátor a druhý od hořáku pro lící pánev.

1. Výpočtový model pro plazmový hořák krystalizátor:
 - o Válec $\varnothing 55 \text{ mm}$ a délce 100 mm



Obr. 24 Výpočtový model pro krystalizátor

Výpočet radičního toku pro proud plazmatu pro krystalizátor

- Teplota proudu plazmatu bude $T_{pla} = 2500 \text{ °C}$, hodnoty jednotlivých emisivit viz kapitola 3.1 Konstrukční návrh krystalizátoru.

$$\phi_{R;1} = \frac{C_o \cdot S_{vmk} \cdot \left[\left(\frac{T_{pla}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{sp}}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \cdot \frac{S_{vmk}}{S_{OK}}} \quad (3.80)$$

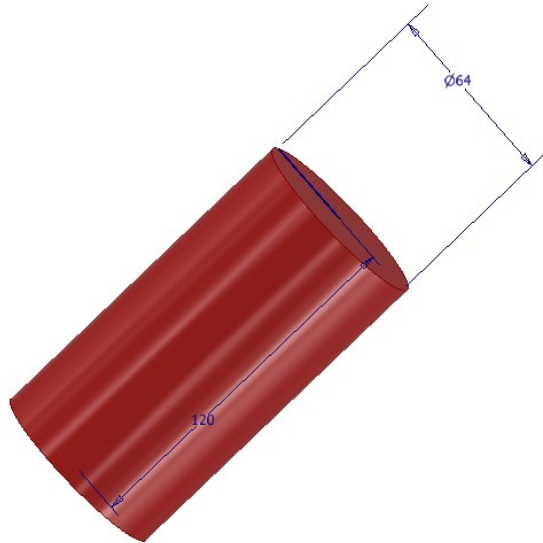
$$\phi_{R;1} = \frac{5,67 \cdot 0,0173 \cdot \left[\left(\frac{2773,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{333,15}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{0,3} + \left(\frac{1}{0,74} - 1 \right) \cdot \frac{0,0173}{1,01}} = 17368,8 \text{ W}$$

- Plocha výpočtového modelu:

$$S_{vmk} = \pi \cdot 0,055 \cdot 0,1 = 0,0173 \text{ m}^2 \quad (3.81)$$

2. Výpočtový model pro plazmový hořák lici pánve:

- Válec Ø64 mm a délce 120 mm



Obr. 25 Výpočtový model pro lici pánev

Výpočet radiačního toku pro proud plazmatu pro lici pánev:

- Teplota proudu plazmatu bude $T_{pla} = 2500 \text{ °C}$

$$\phi_{R;2} = \frac{C_o \cdot S_{vmlp} \cdot \left[\left(\frac{T_{pla}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{sp}}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \cdot \frac{S_{vmlp}}{S_{OK;1}}} \quad (3.82)$$

$$\phi_{R;2} = \frac{5,67 \cdot 0,024 \cdot \left[\left(\frac{2773,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{333,15}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{0,3} + \left(\frac{1}{0,74} - 1 \right) \cdot \frac{0,024}{0,67}} = 24048,16 \text{ W}$$

- Plocha výpočtového modelu:

$$S_{vmlp} = \pi \cdot 0,064 \cdot 0,12 = 0,024 \text{ m}^2$$

- Výpočet plochy okolo licí pánve

$$S_{Ok;1} = \frac{\pi \cdot d_{pec}^2}{4} + \pi \cdot d_{pec} \cdot l_{pec} \quad (3.83)$$

$$S_{Ok;1} = \frac{\pi \cdot 0,7^2}{4} + \pi \cdot 0,7 \cdot 0,13$$

$$S_{Ok} = 0,67 \text{ m}^2$$

3. Celkový radiální tok na vnitřní stěnu pece

$$\phi_{R;C} = \phi_{R;1} + \phi_{R;2} = 17368,8 + 24048,16 = 41417 \text{ W} \quad (3.84)$$

4.6.2 Výpočet chlazení pro podávací a hořákovou sekci

Tab. 8 Výpočet jednotlivých parametrů chladicího systému

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Počet chladicích kanálků	i_{CH}	1	-
Rychlost chladicí vody v obvodu	w_{H_2O}	3	$m \cdot s^{-1}$
Hydraulický průměr kanálku	$d_{h;5}$	0,016	m
Reynoldsovo kritérium	Re_{pahs}	53416	-
Měrná teplotní vodivost chladicí vody	a_{H_2O}	$1,45 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Kinematická viskozita vody	ν_{H_2O}	$8,956 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandlovo kritérium	Pr	6,18	-
Součinitel přestupu tepla	$\alpha_{H_2O;5}$	10857,7	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Stanovení délky chladicího kanálku	-	-	-
- Průřez chladicího kanálku	$S_{CH;k5}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	m^2
- Oteplení vody	$\Delta t_{H_2O;5}$	7,4	$^{\circ}C$
- Teplota chladicí vody na výstupu	$t_{H_2O \text{ vystup};5}$	27,4	$^{\circ}C$
- Průměrná teplota chladicí vody v obvodu	$t'_{H_2O;5}$	23,7	$^{\circ}C$

Pro výpočet jednotlivých veličin v tabulce Tab. 8 jsou použity vzorce z kapitoly 3.1.1 Návrh chlazení krystalizátoru, čísla vzorů (3.9) až (3.21).

4.6.3 Výpočet třecích a místních ztrát

Tlaková ztráta v potrubí pro podávací a hořákovou sekci:

- Výpočet součinitele tření
 - Součinitel tření, Reynoldsovo kritérium je pro daný případ stejné, jako u výpočtu třecí ztráty v potrubí u krystalizátoru, viz kapitola 3.1.2 Výpočet třecích a místních ztrát. $\lambda_1 = 0,1$
- Tlaková ztráta třením
 - Délka hadice od zásobníku do místa propojení s rychlospojkami je $l_{had} = 3 \text{ m}$

$$p_{zt} = \frac{\lambda_1}{d_{pot.}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot l_{had} \quad (3.85)$$

$$p_{zt} = \frac{0,1}{0,01} \cdot 995 \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 3 = 134325 \text{ Pa}$$

Tlaková ztráta v chladicím kanálku ve stěně podávací a hořákové sekce:

- Výpočet součinitele tření [21]
 - $k_1 = 0,015$ [20]

$$\lambda_8 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{Re_{pahs}} + \frac{k_1}{d_{h;5}} \right)^{0,25} \quad (3.86)$$

$$\lambda_8 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{53416} + \frac{0,015}{0,016} \right)^{0,25} = 0,098$$

- Tlaková ztráta třením
 - Celková délka chladicího okruhu $l_{kan;4} = 11,3 \text{ m}$

$$p_{zt_{11}} = \frac{\lambda_8}{d_{h;5}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot l_{kan;4} [\text{Pa}] \quad (3.87)$$

$$p_{zt_{11}} = \frac{0,098}{0,016} \cdot 995 \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 11,3 = 309898,97 \text{ Pa}$$

- Tlaková ztráta v rychlospojce
 - Tlaková ztráta v rychlospojce bud stejná jako v případě výpočtu u krystalizátoru, viz kapitola 3.1.2 Výpočet třecích a místních ztrát.

$$p_{zt_2} = 35163 \text{ Pa}$$

4.7 Konstrukce tvaru a chlazení sekce s krystalizátorem:

4.7.1 Návrh chlazení sekce s krystalizátorem

Pro snížení radiačního toku dopadajícího na podložku pod krystalizátorem od plazmového hořáku, budou použity dvě leštěné stínící podložky a mezi nimi vloženy keramické podložky. Spodní stínící podložka bude umístěna na předem připravené navažené podpěry. Celá stínící soustava bude sloužit k ochraně podložky pod krystalizátor proti případnému odstříknutí taveniny, teplotnímu ovlivnění podložky pod krystalizátor a také ochraně rychlospojek před přímým působením radiačního toku. Stínící podložka bude vyrobena z hliníku.

Pro výpočet se uvažuje přibližně stejný radiační tok jako u sekce hořákové a podávací. Radiační tok na horní část sekce s krystalizátorem bude:

$$\phi_{R;C} = 41417 \text{ W}$$

Tab. 9 Výpočet jednotlivých parametrů chladicího systému

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Počet chladicích kanálků	i_{CH}	2	-
Rychlost chladicí vody v obvodu	w_{H_2O}	3	$m \cdot s^{-1}$
Hydraulický průměr kanálku	$d_{h;6}$	0,017	m
Reynoldsovo kritérium	Re_{ssk}	56755	-
Měrná teplotní vodivost chladicí vody	a_{H_2O}	$1,45 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Kinematická viskozita vody	ν_{H_2O}	$8,956 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandlovo kritérium	Pr	6,18	-
Součinitel přestupu tepla	$\alpha_{H_2O;6}$	10726,9	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Stanovení délky chladicího kanálku	-	-	-
- Průřez chladicího kanálku	$S_{CH;k6}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	m^2
- Oteplení vody	$\Delta t_{H_2O;6}$	3,02	$^{\circ}C$
- Teplota chladicí vody na výstupu	$t_{H_2O_{vystup;6}}$	23,02	$^{\circ}C$
- Průměrná teplota chladicí vody v obvodu	$t'_{H_2O;6}$	21,5	$^{\circ}C$
- Minimální délka chladicího kanálku	$l_{CH;4}$	0,116	m

Pro výpočet jednotlivých veličin v tabulce Tab. 9 jsou použity vzorce z kapitoly 3.1.1 Návrh chlazení krystalizátoru, čísla vzorů (3.9) až (3.21).

4.7.2 Ověření snížení radiačního toku vloženou izolační vrstvou

Vstupní parametry pro výpočet radiačního toku dopadajícího na leštěnou stínici podložku jsou stejné jako při výpočtu radiačního toku od jednotlivých hořáků. [24]

- Počet stínicích prvků $n = 3$
- Emisivita povrchu leštěné stínici podložky $\varepsilon_3 = 0,05$ dle [19]

Od prvního hořáku:

$$\phi_{R;1,s} = \frac{1}{n+1} \cdot \frac{C_o \cdot S_{vmk} \cdot \left[\left(\frac{T_{pla}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{sp}}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_3} - 1 \right) \cdot \frac{S_{vmk}}{S_{OK}}} \quad (3.88)$$

$$\phi_{R;1,s} = \frac{1}{3+1} \cdot \frac{5,67 \cdot 0,0173 \cdot \left[\left(\frac{2773,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{333,15}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{0,3} + \left(\frac{1}{0,05} - 1 \right) \cdot \frac{0,0173}{1,01}} = 3963,1 \text{ W}$$

Od druhého hořáku:

$$\phi_{R;2,s} = \frac{1}{n+1} \cdot \frac{C_o \cdot S_{vmlp} \cdot \left[\left(\frac{T_{pla}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{sp}}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_3} - 1 \right) \cdot \frac{S_{vmlp}}{S_{OK;1}}} \quad (3.89)$$

$$\phi_{R;2,s} = \frac{1}{3+1} \cdot \frac{5,67 \cdot 0,024 \cdot \left[\left(\frac{2773,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{333,15}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{0,3} + \left(\frac{1}{0,05} - 1 \right) \cdot \frac{0,024}{0,67}} = 5011,5 \text{ W}$$

Celkový radiační tok, který projde vrstvou stínění

$$\phi_{R;C,s} = \phi_{R;1,s} + \phi_{R;2,s} = 3963,1 + 5011,5 = 8974,6 \text{ W} \quad (3.90)$$

Při použití stínicí vrstvy byl snížen radiační tok na $\sim 21,6\%$ původní hodnoty.

4.7.3 Třecí a místní ztráty v proudění

Tlaková ztráta v potrubí pro krystalizátorovou sekci:

- Výpočet součinitele tření
 - Součinitel tření, Reynoldsovo kritérium je pro daný případ stejné, jako u výpočtu třecí ztráty v potrubí u krystalizátoru, viz kapitola 3.1.2 Výpočet třecích a místních ztrát.

$$\lambda_1 = 0,1$$

- Tlaková ztráta třením
 - Délka hadice od zásobníku do místa propojení s rychlospojkami je l_{had}

$$p_{zt} = \frac{\lambda_1}{d_{pot.}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot l_{had} \quad (3.91)$$

$$p_{zt} = \frac{0,1}{0,01} \cdot 995 \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 3 = 134325 \text{ Pa}$$

Tlaková ztráta v chladicím kanálku ve stěně krystalizátorové sekce:

- Výpočet součinitele tření [21]
 - $k_1 = 0,015$ [20]

$$\lambda_9 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{Re_{ssk}} + \frac{k_1}{d_{h;6}} \right)^{0,25} \quad (3.92)$$

$$\lambda_9 = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{56755} + \frac{0,015}{0,017} \right)^{0,25} = 0,097$$

- Tlaková ztráta třením
 - Celková délka chladicího okruhu $l_{kan;5} = 4,52 \text{ m}$

$$p_{zt12} = \frac{\lambda_9}{d_{h;6}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot l_{kan;5} [\text{Pa}] \quad (3.93)$$

$$p_{zt12} = \frac{0,097}{0,017} \cdot 995 \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 4,52 = 115477,4 \text{ Pa}$$

- Tlaková ztráta v rychlospojce
 - o Tlaková ztráta v rychlospojce bude stejná jako v případě výpočtu u krystalizátoru, viz kapitola 3.1.2 Výpočet třecích a místních ztrát.

$$p_{zt_2} = 35163 \text{ Pa}$$

4.8 Konstrukce tvaru a chlazení sekce pro tažení a dochlazování

4.8.1 Návrh chlazení sekce pro tažení a dochlazování

Stanovení radiačního výkonu:

$$\phi_{R;3} = \frac{C_o \cdot S_{ks} \cdot \left[\left(\frac{T_{Výs}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{Sp}}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \cdot \frac{S_{ks}}{S_{OK;2}}} \quad (3.94)$$

$$\frac{5,67 \cdot 0,017 \cdot \left[\left(\frac{1923,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{333,15}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{0,3} + \left(\frac{1}{0,74} - 1 \right) \cdot \frac{0,017}{0,836}}$$

$$\phi_{R;3} = 3943,5 \text{ W}$$

Výpočet okolní plochy:

$$S_{OK;2} = \pi \cdot d_{chs} \cdot l_{chs} \quad (3.95)$$

$$S_{OK;2} = \pi \cdot 0,7 \cdot 0,38 = 0,836 \text{ m}^2$$

Tab. 10 Výpočet jednotlivých parametrů chladicího systému

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Radiační tok	$\phi_{R;3}$	3943,5	W
Počet chladicích kanálku	i_{CH}	9	-
Rychlost chladicí vody v obvodu	w_{H_2O}	3	$m \cdot s^{-1}$
Hydraulický průměr kanálku	$d_{h;7}$	0,015	m
Reynoldsovo kritérium	Re_{stad}	50078	-
Měrná teplotní vodivost chladicí vody	a_{H_2O}	$1,45 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Kinematická viskozita vody	ν_{H_2O}	$8,956 \cdot 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Prandlovo kritérium	Pr	6,18	-
Součinitel přestupu tepla	$\alpha_{H_2O;7}$	10998,8	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Stanovení délky chladicího kanálku	-	-	-
- Průřez chladicího kanálku	$S_{CH;k7}$	$3 \cdot 10^{-4}$	m^2
- Oteplení vody	$\Delta t_{H_2O;7}$	0,5	$^{\circ}C$

- Teplota chladicí vody na výstupu	$t_{H_2O_{vystup;7}}$	20,5	°C
- Průměrná teplota chladicí vody v obvodu	$t'_{H_2O;7}$	20,25	°C
- Minimální délka chladicího kanálku	$l_{CH;5}$	$3 \cdot 10^{-3}$	m

Pro výpočet jednotlivých veličin v tabulce Tab. 10 jsou použity vzorce z kapitoly 3.1.1 Návrh chlazení krystalizátoru, čísla vzorů (3.9) až (3.21).

4.8.2 Výpočet třecí a místních ztrát

Tlaková ztráta v potrubí pro stěnu licí pánve:

- Výpočet součinitele tření
 - Součinitel tření, Reynoldsovo kritérium je pro daný případ stejné, jako u výpočtu třecí ztráty v potrubí u krystalizátoru, viz kapitola 3.1.2 Výpočet třecích a místních ztrát: $\lambda_1 = 0,1$
- Tlaková ztráta třením
 - Délka hadice od zásobníku do místa propojení s rychlospojkami je $l_{had;4}$

$$p_{zt13} = \frac{\lambda_1}{d_{pot.}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot l_{had} \quad (3.96)$$

$$p_{zt13} = \frac{0,1}{0,01} \cdot 995 \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 5 = 223875 \text{ Pa}$$

Tlaková ztráta v chladicím kanálku ve stěně licí sekce pro tažení a dochlazování:

- Výpočet součinitele tření [21]
 - $k_1 = 0,015$ [20]

$$\lambda_{10} = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{Re_{stad}} + \frac{k_1}{d_{h;7}} \right)^{0,25} \quad (3.97)$$

$$\lambda_{10} = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{50078} + \frac{0,015}{0,015} \right)^{0,25} = 0,1$$

- Tlaková ztráta třením
 - Celková délka chladicího okruhu $l_{kan;6} = 20,36 \text{ m}$

$$p_{zt14} = \frac{\lambda_{10}}{d_{h;7}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{w_{H_2O}^2}{2} \cdot l_{kan;6} \quad (3.98)$$

$$p_{zt14} = \frac{0,122}{0,015} \cdot 995 \cdot \frac{3^2}{2} \cdot 20,36 = 741450,12 \text{ Pa}$$

- Tlaková ztráta v rychlospojce
 - Tlaková ztráta v rychlospojce bude stejná jako v případě výpočtu u krystalizátoru, viz kapitola 3.1.2 Výpočet třecích a místních ztrát.

$$p_{zt_2} = 35163 \text{ Pa}$$

4.9 Návrh čerpadla chladicí vody

4.9.1 Součet celkových místních a tlakových ztrát v jednotlivých okruzích

1. Víko pece

$$p_{c,1} = p_{zt,9} + p_{zt_{10}} + p_{zt_2} \quad (3.99)$$

$$p_{c,1} = 89550 + 173310 + 35163 \cdot 2 = 333186 \text{ Pa}$$

2. Podávací a hořáková sekce

$$p_{c,2} = p_{zt} + p_{zt_{11}} + p_{zt_2} \quad (3.100)$$

$$p_{c,2} = 134325 + 309898,97 + 35163 \cdot 2 = 514549,9 \text{ Pa}$$

3. Lící pánev

$$p_{c,3} = p_{zt,3} + p_{zt_4} + p_{zt_5} + p_{zt_6} \quad (3.101)$$

$$p_{c,3} = 423123,8 + 143493,9 + 133267,9 + 4 \cdot 35163 = 840537,6 \text{ Pa}$$

4. Krystalizátor

$$p_{c,4} = p_{zt} + p_{zt_2} + \Delta p_{z,KR} \quad (3.102)$$

$$p_{c,4} = 57141,2 + 4 \cdot 35163 + 39402 = 237195,2 \text{ Pa}$$

5. Sekce s krystalizátorem

$$p_{c,5} = p_{zt} + p_{zt_{12}} + \Delta p_{zt_2} \quad (3.103)$$

$$p_{c,5} = 134325 + 115477,4 + 2 \cdot 35163 = 320128,4 \text{ Pa}$$

6. Sekce pro tažení a dochlazování

$$p_{c,6} = p_{zt_{13}} + p_{zt_{14}} + \Delta p_{zt_2} \quad (3.104)$$

$$p_{c,6} = 223875 + 741450,12 + 2 \cdot 35163 = 1035651,12 \text{ Pa}$$

4.9.2 Volba ostatních komponentů chladicího okruhu

Dále se v chladicím okruhu bude nacházet [26]:

- Elektromagnetický ventil TORC T-GP102 DN 10
- Montážní sada Siemens WFZ.E110-I + teplotní čidlo
- Spojení hlavního rozváděcího potrubí do jednotlivých ramen bude provedeno pomocí ocelových bezešvých závitových trubek DN 10
 - o Výpočet proveden dle vzorců (3.97) až (3.98),
 - o Tlaková ztráta v jedné větvi potrubí DN 10: $p_{zt15} = 77366,9 \text{ Pa}$
- Indukční průtokoměr FLOW – 40 DN 10
- Plastová sběrná nádrž
- Chladič oteplené vody

4.9.3 Volba čerpadla a elektromotoru

Dle vypočtených tlakových a místních ztrát v jednotlivých částech plazmové pece bude voleno čerpadlo: VPPM-073PQNC-R55S/10N000/M050 [26] a elektromotor k čerpadlu bude: Elektromotor SIEMENS 1LA7090-2 [27].

4.10 Návrh systému sání

Celá pec bude rozdělena do dvou okruhů sání ochranné atmosféry. První část bude tvořit sekce podávací a hořáková a krystalizátorová sekce. Druhou část bude tvořit sekce pro tažení a dochlazování kontislitku. Obě části budou spojeny dírou.

Pro obě části budou použity bezolejové vývěvy ROCKER 800 (428 500 167 800) - rychlost čerpání je $84 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Na vstupu a výstupu z pecních prostorů budou použity hadicové adaptéry GF-11511R14-7. Propojení hadicových adaptérů bude provedeno pomocí PTFE hadice HOS-PT1210.

Na výstupu z pecního prostoru bude umístěn kyslíkový analyzátor OXYMETR GREISINGER GOX 100, který bude měřit koncentraci kyslíku v pecním prostoru.



Obr. 26 Bezolejová vývěva ROCKER 800

5 Technická zpráva

5.1 Popis jednotlivých částí pece

Víko plazmové pece:

Víko plazmové pece se bude skládat ze dvou částí. Horní i dolní část víka (výkresy KLI0137-016 a KLI0137-017) budou vyráběny třískovým obráběním z materiálu S355JR. V dolní části víka bude vyfrézovaná drážka, která bude sloužit k vedení chladicí kapaliny ve víku. Přívod a odvod chladicí kapaliny do víka zajistí rychlospojky QD3H.

Obě části víka k sobě budou spojeny zápusťnými šrouby M20 x 50 (pozice 9, výkres KLI0137-015). Ve víku bude vyroben nahlížečský otvor (pozice 3,4; výkres KLI0137-015), který bude sloužit jednak k vizuální kontrole procesu tavení termokamerou a také pro čidla infračervených teploměrů, které budou měřit teplotu v místě tavení jak u lící pánve, tak u krystalizátoru.

Dále se ve víku nachází dva otvory opatřeny hydraulickým těsněním pro vstup hořáku do místa tavby. Pohyb hořáku zajistí opět aktuátory. Na horní části víka se nachází 4 ks závěsných ok se šroubem M20 (pozice 10, výkres KLI0137-015), pomocí kterých se bude s víkem manipulovat. Ve víku se nachází i otvor, do kterého je přišroubován hadicový adaptér pro připojení k bezolejové vývěvě pro odvod atmosféry z vnitřní části pece.



Obr. 27 Víko pece

Podávací a hořáková sekce:

Podávací a hořáková sekce bude tvořena několika částmi. Vnitřní plášť sekce (pozice 2, výkres KLI0137-036) bude vyroben z ocelové trubky o průměru 760 mm. Vnější plášť sekce (pozice 1, výkres KLI0137-036) bude vyroben z ocelové trubky o průměru 780 mm. Mezi vnějším a vnitřním pláštěm vznikne mezera o tloušťce 10 mm. Obě části pece budou obrobeny na požadovaný rozměr.

Na vnější část vnitřní části sekce se navaří svařovací drát o průměru 10 mm. Svařovací drát bude tvořit spirálu o dané rozteči. Mezi jednotlivými navařenými dráty vznikne chladicí kanálek, kterým bude proudit chladicí kapalina. Vnější část pece se poté nasune na takto připravenou sestavu. Z horní a spodní části se na takto připravenou sestavu přivaří příruby, které slouží k připojení k dalším částem pece.

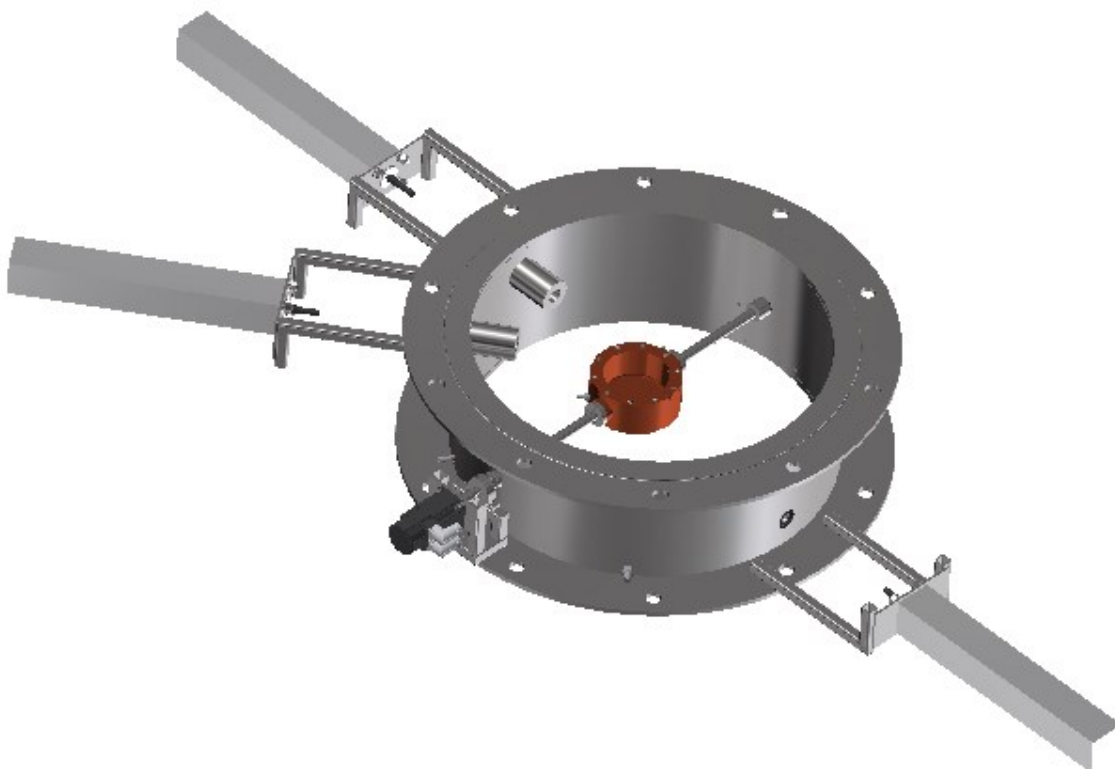
Na příruby budou svarovým spojením připojeny rámy pro uchycení aktuátoru (pozice 5, výkres KLI0137-036), a také rám pro uchycení servomotoru (pozice 6, výkres KLI0137-036).

Průchody stěnami pece z vnitřního prostoru ven budou zajištěny vyvrtanými dírami. V prostoru mezi pláště pece, kde se nachází chladicí kapalina, budou přivařeny průchodky (pozice 10, výkres KLI0137-036), které zabrání úniku chladicí kapaliny do prostoru pece nebo okolí pece.

Posun polotovaru do místa tavby zajistí aktuátory, připevněny šroubovým spojením k rámu pro aktuátor. Vstup polotovaru uvnitř pece bude chlazen, aby se zabránilo dalšímu oteplení polotovaru v místě spojení s aktuátorem. Do polotovaru se z jedné strany vyvrtá závitová díra a o určitou vzdálenost od okraje se obrobí zápich, který bude sloužit ke zmenšení tepelného toku proudícího do aktuátoru přes místo propojení. Ověření snížení tepelného toku bude provedeno v kapitole 5.1 Teplotní analýza průběhu teploty v polotovaru pomocí metody konečných prvků v programu Ansys. Na vstupu polotovaru do pece bude umístěno hydraulické těsnění, které zabrání vniku kyslíku do pecního prostoru.

Dále se na příruby přivaří podložka pod ložiskový domek (pozice 7, výkres KLI0137-036), která bude sloužit k uchycení ložiska otočného hřídele. Uvnitř podávací a hořákové sekce se nachází lící pánev.

Vstup ochranné atmosféry do vnitřního prostoru bude realizován ve stěně sekce dle výkresové dokumentace (KLI0137-036)



Obr. 28 Podávací a hořáková sekce

Prostup hadic s chladicí kapalinou pláští sekce bude provedeno pomocí vodotěsných kabelových vývodů SHV 13,5/9/9.

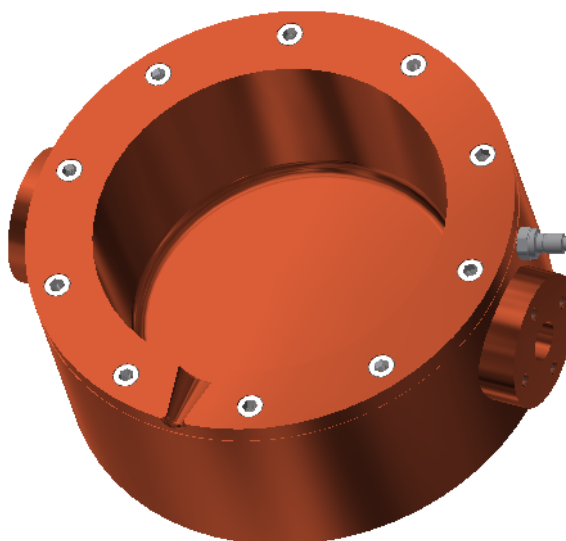
Licí pánve:

Licí pánve se bude skládat ze dvou částí, vnitřní část licí pánve (KLI0137-051) a vnější část licí pánve (KLI0137-050). Obě části budou vyráběny třískovým obráběním. Na vnitřní část licí pánve bude přivařen drát o dané rozteči, který vytvoří chladicí kanálky po obvodu licí pánve. Takto připravená sestava se nasune do vnější části licí pánve a přišroubuje se sobě šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem M6 x 18.

Ve vnější části licí pánve budou připraveny otvory se závitem M6. Vespod vnější části licí pánve bude vyfrézována spirála o dané rozteči, kterou povede chladicí voda, která bude chladit dno licí pánve.

Chladicí voda bude přivedena do licí pánve pomocí rychlospojek QD1H (pozice 6,7; výkres KLI0137-49). Rychlospojky se připevní do předem připravených otvorů ve dně a na plášti licí pánve.

Na plášť licí pánve se nakonec přivaří měděné příruby (pozice 4, výkres KLI0137-049), ve kterých budou vyvrtány závitové díry, ke kterým se připevní otočný hřídel. Otočný hřídel spolu se servomotorem bude vykonávat výklopný pohyb licí pánve při odlévání.



Obr. 30 Licí pánev

Sekce s krystalizátorem:

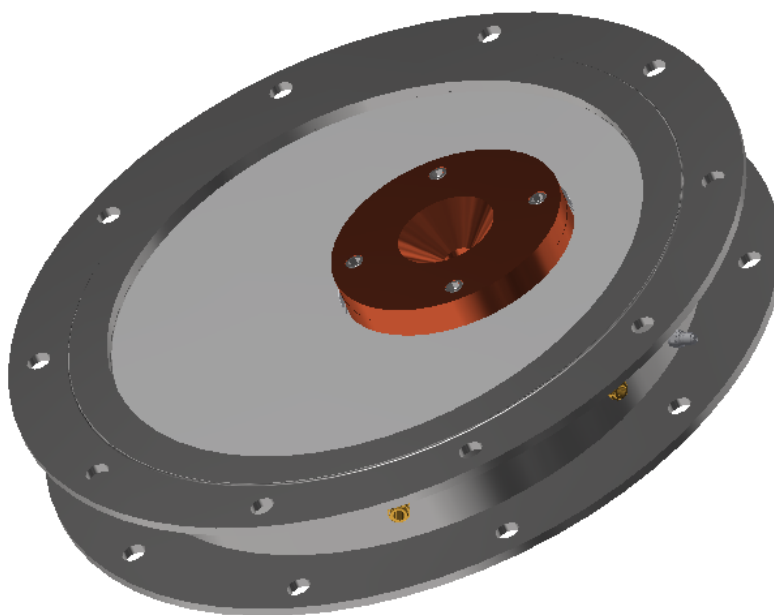
Sekce s krystalizátorem bude tvořena několika částmi. Vnitřní plášť sekce (pozice 2, výkres KLI0137-005) bude vyroben z ocelové trubky o průměru 760 mm. Vnější plášť sekce (pozice 1, výkres KLI0137-005) bude vyroben z ocelové trubky o průměru 780 mm. Mezi vnějším a vnitřním pláštěm vznikne mezera o tloušťce 10 mm. Obě části pece budou obrobena na požadovaný rozměr.

Na vnější část vnitřní části sekce se navaří svařovací drát o průměru 10 mm. Svařovací drát bude tvořit spirálu o dané rozteči. Mezi jednotlivými navařenými dráty vznikne chladicí kanálek, kterým bude proudit chladicí kapalina. Vnější část pece se poté nasune na takto připravenou sestavu. Z horní části a ze spodní části se na takto připravenou sestavu přivaří příruby, které slouží k připojení k dalším částem pece. Na vnitřní stranu vnitřní části sekce se přivaří uchycení stínění (pozice 6, výkres KLI0137-005).

Průchody stěnami pece z vnitřního prostoru ven budou zajištěny vyvrtanými dírami. V prostoru mezi pláště pece, kde se nachází chladicí kapalina, budou přivařeny průchodky (pozice 4, výkres KLI0137-005), které zabrání úniku chladicí kapaliny do prostoru pece nebo okolí pece.

Průchod stěnami pece, kterým budou proházet hadice $\text{di}10 \times 15$, zajistí vodotěsná kabelová vývodka SHV 21/16/16.

Přívod a odvod chladicí vody do sekce s krystalizátorem bude proveden pomocí rychlospojek QD3H na vnější části sekce.

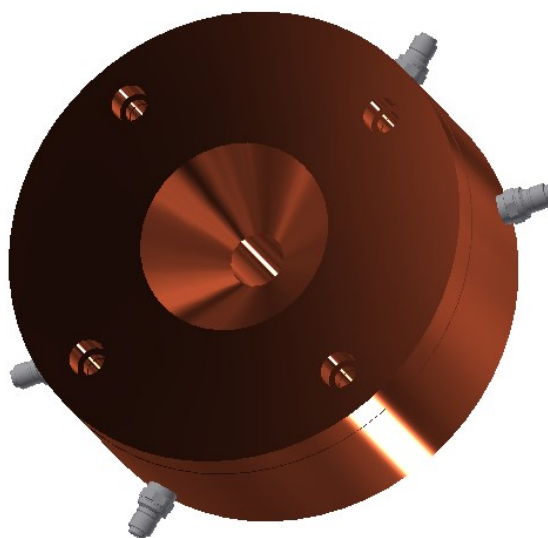


Obr. 31 Sekce s krystalizátorem

Krystalizátor:

Krystalizátor se bude skládat ze dvou částí. Horní část krystalizátoru bude vyráběna třískovým obráběním. Na vnějším plášti horní části krystalizátoru budou vyfrézovány drážky pro vedení chladicí kapaliny a odvod tepla. Dolní část krystalizátoru bude rovněž vyráběna třískovým obráběním. V dolní části krystalizátoru budou vyvrtány díry, které budou přesně směřovat na chladicí kanálky v horní části krystalizátoru a povedou chladicí kapalinu do nitra krystalizátoru. Připojení krystalizátoru na chladicí okruh pece bude proveden pomocí rychlospojek QD3H.

Jednotlivé části krystalizátoru budou připevněny k podložce (pozice 3, výkres KLI0137-013) šroubovým spojením dle výkresu KLI0137-013.



Obr. 32 Krystalizátor

Sekce pro tažení a dochlazování:

Sekce pro tažení a dochlazování bude tvořena několika částmi. Vnitřní plášť sekce (pozice 2, výkres KLI0137-019) bude vyroben z ocelové trubky o průměru 760 mm. Vnější plášť sekce (pozice 1, výkres KLI0137-019) bude vyroben z ocelové trubky o průměru 780 mm. Mezi vnějším a vnitřním pláštěm vznikne mezera o tloušťce 10 mm. Obě části pece budou obrobena na požadovaný rozměr.

Na vnější část vnitřní části sekce se navaří svařovací drát o průměru 10 mm. Svařovací drát bude tvořit spirálu o dané rozteči. Mezi jednotlivými navařenými dráty vznikne chladicí kanálek, kterým bude proudit chladicí kapalina. Vnější část pece se poté nasune na takto připravenou sestavu. Z horní části a ze spodní části se na takto připravenou sestavu přivaří příruby, které slouží k připojení k dalším částem pece. Na stěně sekce bude vytvořen nahlížeč otvor, který bude sloužit jednak k vizuální kontrole procesu tažení a dochlazování a také zde bude umístěn infračervený teploměr, který bude mířit do místa výstupu kontislitku z krystalizátoru do sekce kvůli sledování teploty povrchu a případném regulování rychlosti tažení.

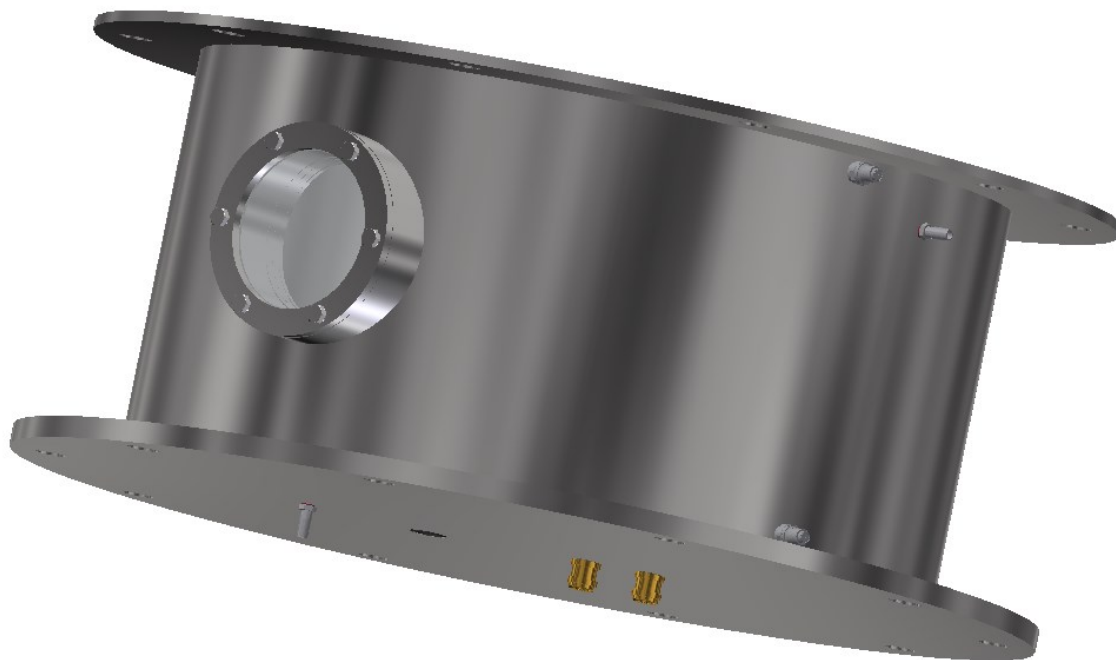
Tažení kontislitku bude realizováno pomocí měděné, vodou chlazené zátky připevněné na ocelovou tyč (KLI0137-031) a celá sestava bude šroubovým spojením připevněna ke zvedacímu sloupku, který zajistí přímočarý pohyb zátky. Měděná zátka má na horní části vyfrézovanou rybinovou drážku, která se pod úhlem zužuje a zajistí uchycení, tažení kontislitku a také snadné vysunutí kontislitku po ochlazení. K zátce bude přivedena chladicí kapalina hadicí a bude připojena pomocí rychlospojek QD1H k táhlu zátky. Chlazení zátky bude realizováno jako „trubka v trubce“ s tím, že vnitřním průměrem půjde chladicí voda pod zátku a vnějším se bude vracet oteplená do zásobníku. Zátka se bude pohybovat v ose krystalizátoru. Rychlost pohybu zátky bude sledovat čidlo, které bude posílat informace řídicímu systému pece. Zvedací sloupek bude připevněn ke spodnímu rámu pece, na kterém bude připravena podložka, šroubovým spojením. Na spodní přírubě sekce bude přivařeno uchycení zátky (pozice 5, výkres KLI0137-019), do kterého zátka po ochladnutí kontislitku zajede a tím nedojde k poškození nebo vyosení celé sestavy zátky při vysouvání kontislitku. V uložení zátky jsou vyfrézovány drážky pro příjezd rychlospojek a proto se nemusí nic odpojovat nebo demontovat před vytažením kontislitku. Vstup zátky do prostoru pece bude realizován před otvorem ve dně pece. V otvoru se bude nacházet hydraulické těsnění, které zajistí těsnost pecního prostoru.

Část průchodů bude realizována stěnami pece. Opět se bude jednat o vyvrtané díry, které bude spojoval připravená průchodka mezi jednotlivými částmi sekce, kde se nachází chladicí kapalina. Zbylé průchody budou realizovány ve dně sekce, kvůli snadnější výrobě.

Sekce pro tažení a dochlazování bude mít své vlastní vstupní a výstupní napojení na ochrannou atmosféru. Vstup ochranné atmosféry bude realizován ve dně pece pomocí hadicového adaptéru. Výstup ochranné atmosféry, případně odsátí před procesem tavení vzduchu z pecního prostoru, bude realizován v horní části sekce, opět pomocí hadicového adaptéru.

Průchod stěnami pece, kterým budou proházet hadice, zajistí vodotěsná kabelová vývodka SHV 13,5/9/9.

Přívod a odvod chladicí vody do sekce pro tažení a dochlazování bude proveden pomocí rychlospojek QD3H na vnější části sekce.

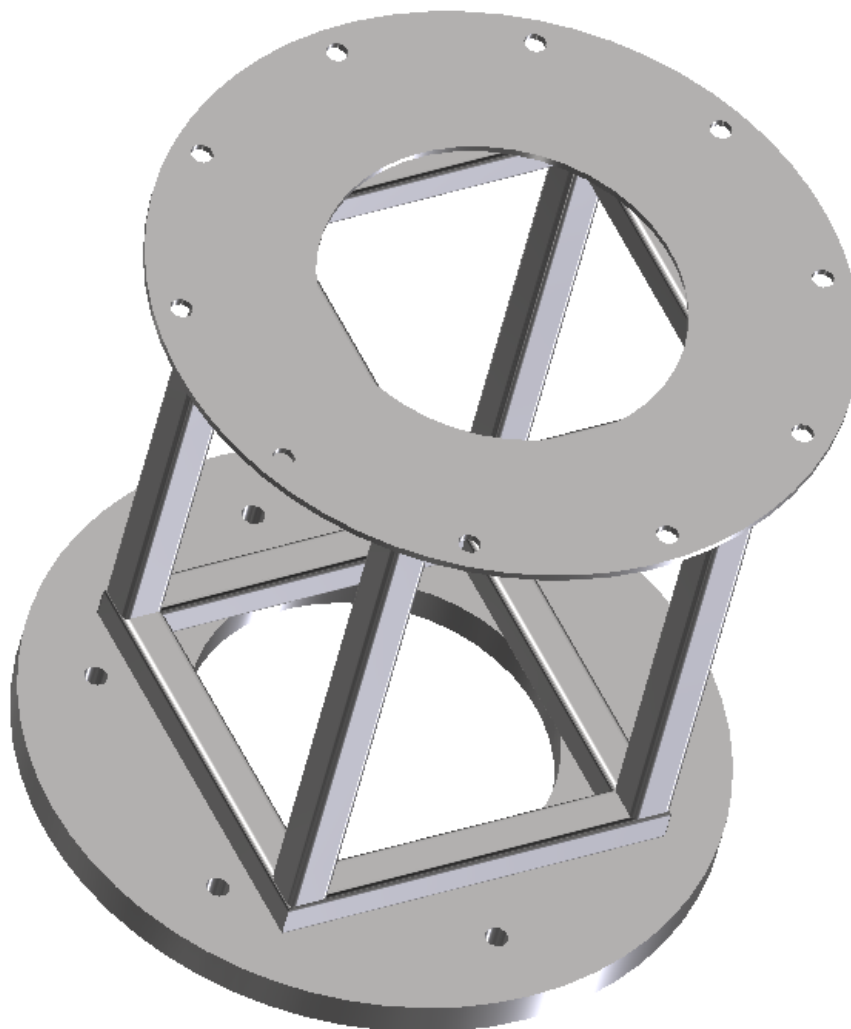


Obr. 33 Sekce pro tažení a dochlazování

Rám pece:

Rám pece, na kterém bude celé předešlé zařízení stát, se bude vyrábět ze čtvercového profilu dutého 60 x 5 EN 10219. Celá sestava bude svařena dle výkresové dokumentace (KLI0137-029). Ke svařovanému rámu se z horní části přivaří horní příruba pece (pozice 3, výkres KLI0137-027), která bude sloužit k připojení sekce pro tažení a dochlazování a k spodní části rámu se opět přivaří příruba, tentokrát dolní příruba rámu pece (pozice 2, KLI0137-027), která bude sloužit ke kotvení celé pece k podkladu (betonu). K rámu pece bude připevněna podložka, která ponese zvedací sloupek.

Postup výroby bude následující: podložka se připojí k zvedacímu sloupku pomocí připravených šroubů, celá sestava se umístí do pece a přesně vycentruje osová poloha vůči sekcím i krystalizátoru a poté se podložka přivaří k rámu pece.



Obr. 34 Rám pece

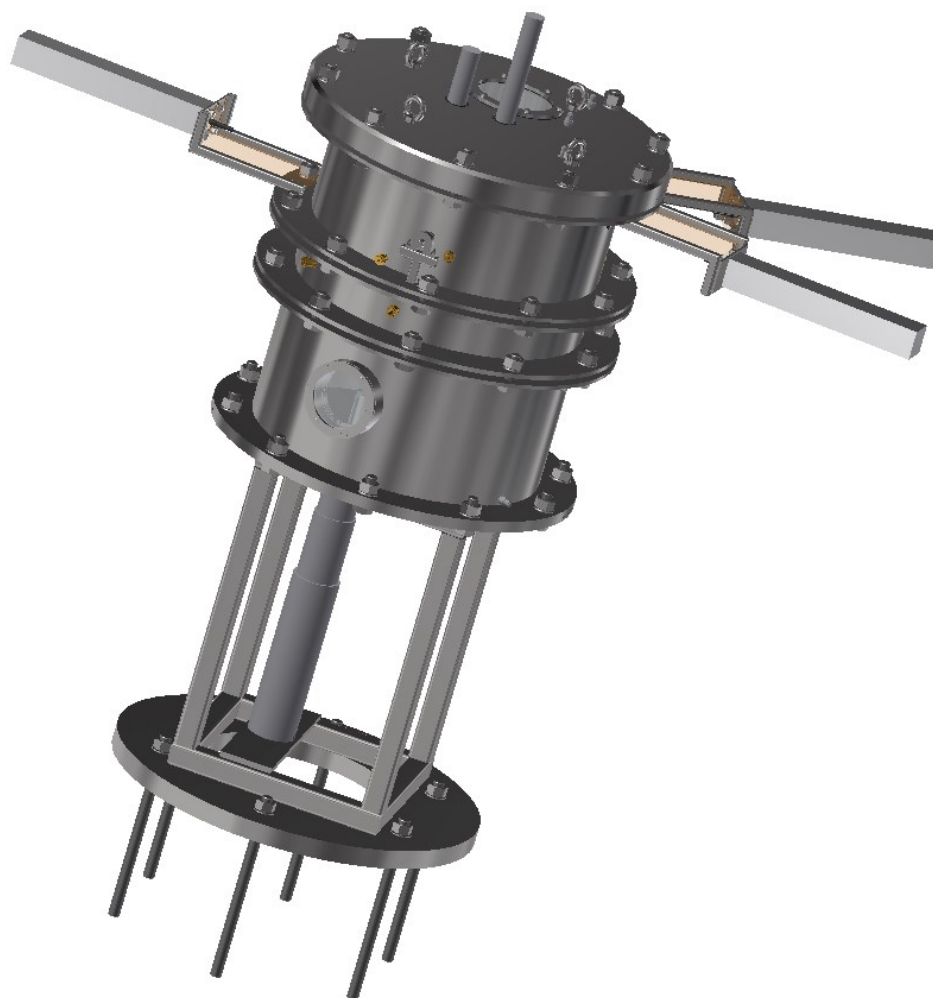
Plazmová pec:

Pec se bude skládat z jednotlivých sekcí. Každá sekce bude mít svůj předem stanovený účel. Jednotlivé sekce k sobě budou přišroubovány šrouby M30. Mezi spojující příruby se vloží těsnění, které zajistí hermetizaci pecního prostoru. Plazmová pec bude kotvena do země šrouby RG M30/500 mm, které se budou kotvit do předem připravených děr o průměru 35 mm. Do děr se vloží chemická kotva, dodávána ke kotvicím šroubům, a také šroub. Celá sestava se nechá vytvrdit po dobu danou výrobcem (například při teplotě 10 až 20 °C je doba vytvrzení směsi 20 min). Po vytvrzení se celá pec připevní k takto připraveným šroubům a dotáhne se utahovacím momentem 300 Nm.

Pracovní rozměry a také váha pece bez chladicího média jsou patrné z výkresu (KLI0137-001).

Celá pec bude připojena na řídicí systém, který bude sledovat jednotlivá čidla, teploměry a další součásti, které jsou na peci instalovány, a bude pomocí něj možné celou

pec řídit. V případě nestandardních podmínek uvnitř pece, například špatné atmosféry nebude proces tavení zahájen. Totéž platí při nedodržení výstupní teploty z krystalizátoru. Nejprve se bude upravovat rychlost tavení, rychlost podávání případně výkon plazmového hořáku a při opakovaném nedodržení podmínek procesu tavení se celá pec bude dát zastavit.



Obr. 35 Plazmová pec

Chladicí okruh pece:

Výstup chladicí kapaliny z plastové sběrné nádoby zajistí čerpadlo „VPPM-073PQNC-R55S/10N000/M050“ s elektromotorem „Elektromotor SIEMENS 1LA7090-2“. Čerpadlo tlačí vodu přes elektromagnetický ventil, který je napojen na řídicí systém pece a slouží k případným regulacím průtoku na vstupu chladicí vody do rozvaděče. Dále se zde nachází zpětný ventil, který zabrání, při vypnutí chladicího okruhu, vrácení veškeré vody zpět do zásobníku a udrží ji v okruhu. Chladicí voda bude vstupovat do rozdělovače, který ji bude rozdělovat do jednotlivých částí pece. Výstup z rozdělovače je pro všechny okruhy realizován bezešvými trubkami DN 10. V každé výstupní větvi bude elektromagnetický ventil, pro uzavření přívodu chladicí vody například při demontáži jednotlivých částí pece

nebo uzavření sekce po dokončení procesu tavení, škrticí klapka pro regulaci průtoku, indukční průtokoměr, který bude sledovat rychlost proudění chladicí kapaliny a posílat informace řídicímu systému pece aby se dodržela rychlost uvnitř chlazených okruhů a případně se mohl regulovat průtok.

Před pecí bude potrubí DN 10 ukončeno a připojí se a něj šroubovým spojením rychlospojka, na kterou se napojí vstupní hadice, které povedou do pecního prostoru případně pro chlazení jednotlivých sekcí pece.

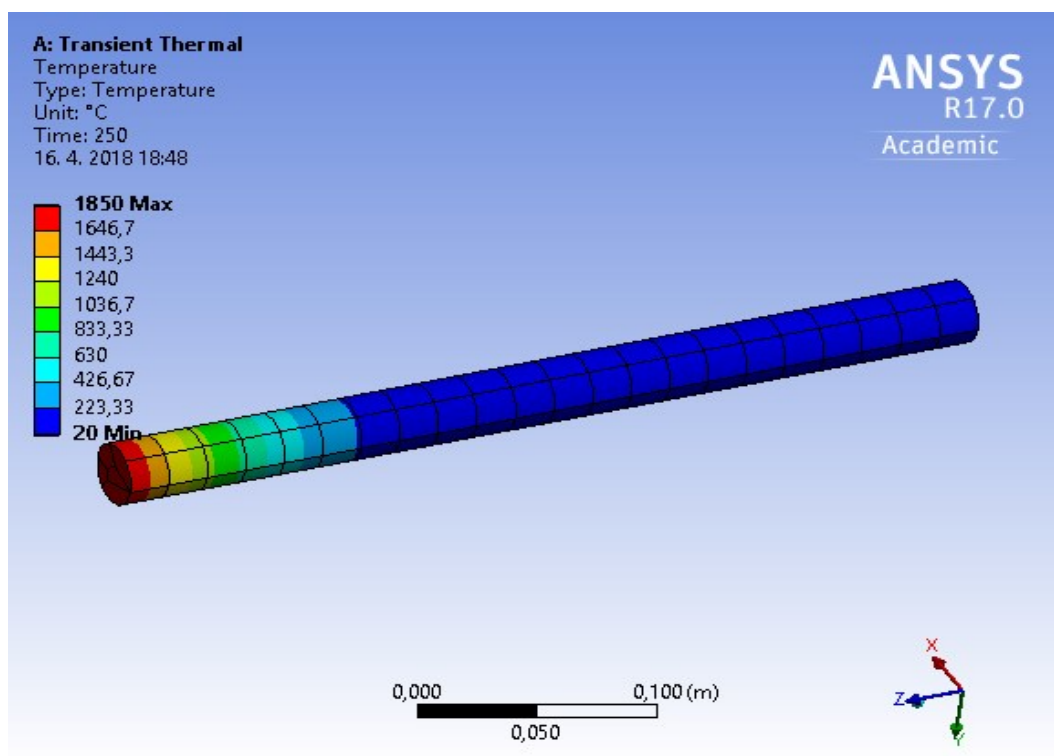
Výstup teplé vody z pece bude proveden stejně jako vstup, s tím rozdílem, že na výstupu už bude pouze teplotní čidlo, které bude sledovat teplotu chladicí vody, zasílat informace řídicímu systému pece, který bude moci podle informací regulovat průtok na vstupu a v případě dokončení tavby a ochlazení všech dílu v dané sekci i chladicí okruh zcela uzavřít. Všechny chladicí okruhy na výstupu se budou opět sbírat do rozdělovače, který bude směřovat teplou chladicí vodu přes chladič zpět do sběrné nádrže. Schéma zapojení chladicího okruhu pece je patrné z přiloženého výkresu.

6 MKP analýza

6.1 Teplotní analýza průběhu teploty v polotovaru podavače

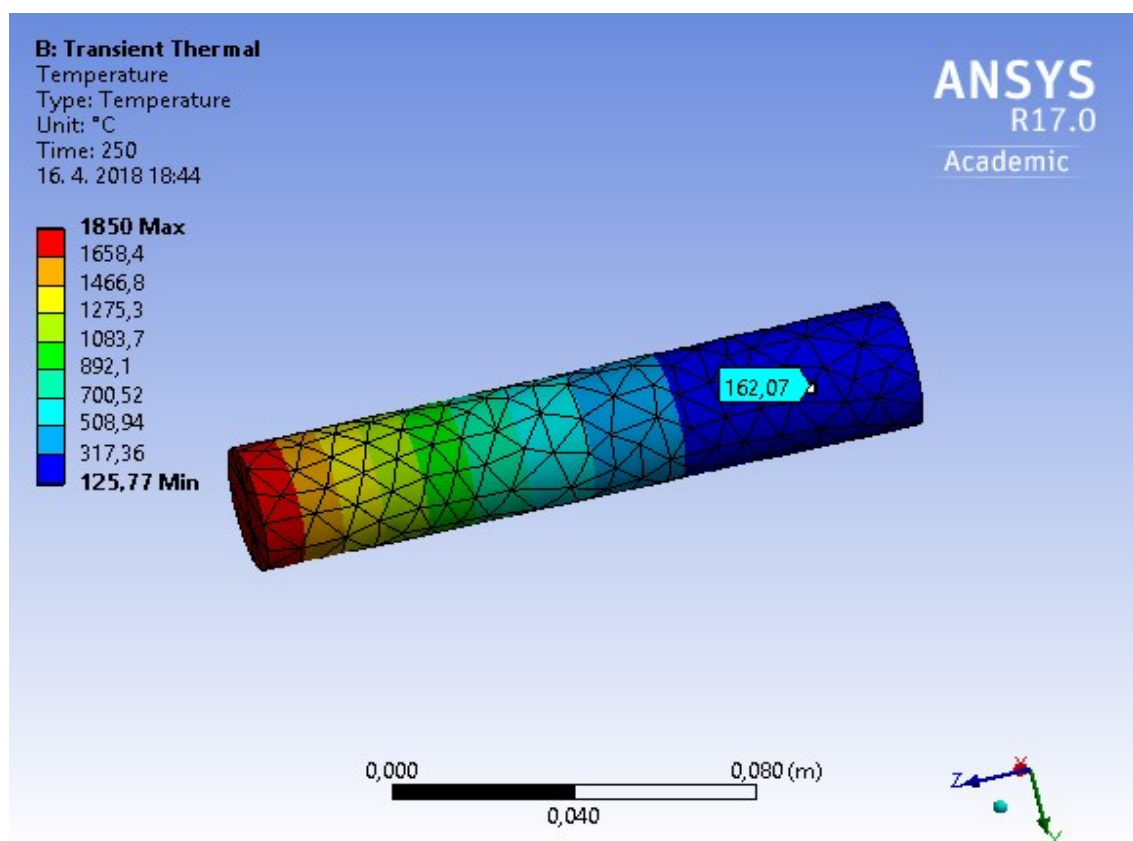
Polotovary vstupující do pecního prostoru pro tavení byly podrobeny teplotní analýze, při které bylo zjištěno teplotní pole a teploty v jednotlivých částech polotovaru během procesu tavení a po jeho ukončení.

Nejprve se podrobil simulaci polotovar o plné délce a průměru 30 mm, dle zprávy. Na čelo polotovaru působila teplota 1850 °C po dobu 250 sekund a sledovalo se teplotní pole a teplota v délce polotovaru. Zobrazení teplotního pole je znázorněno na obr. 36. Teplotní pole po 250 sekundách od počátku tavení.

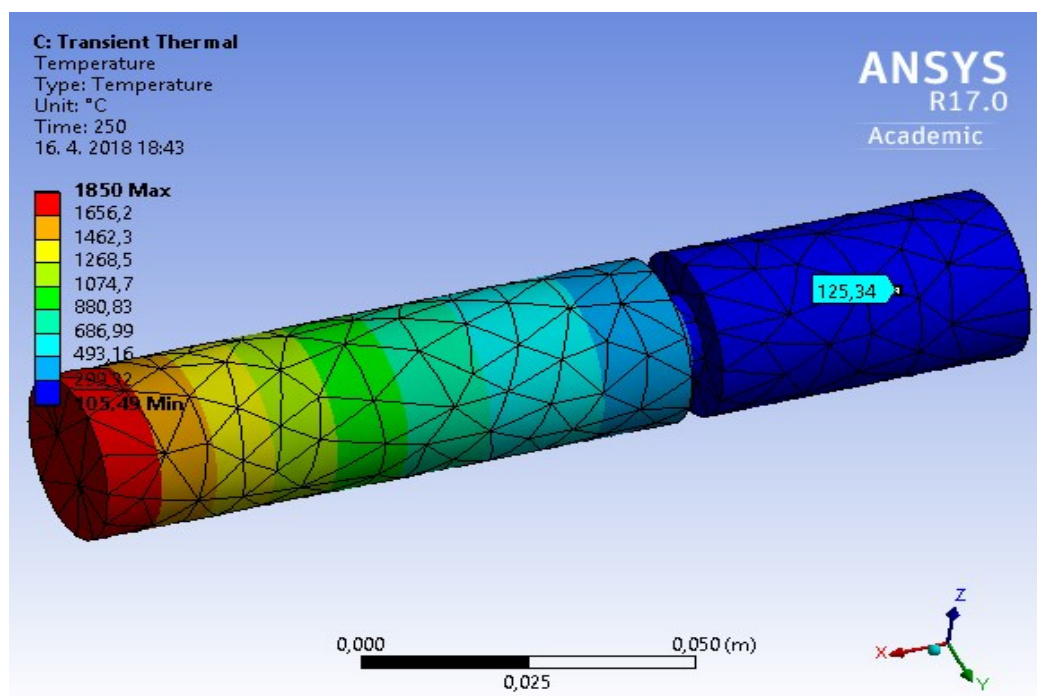


Obr. 36 Teplotní pole po 250 sekundách od počátku tavení

Jako další se podrobila teplotní analýze zbylá část polotovaru, která zůstane po procesu tavení. Nejprve se testovalo teplotní pole a teplota po procesu tavení na předem neupraveném konci polotovaru. Důležitým sledovaným parametrem byla teplota v místě spojení s aktuátorem. Po teplotní analýze bylo zjištěno, že teplota v místě kontaktu bude přibližně 162 °C, jak je patrné z obr. 37. Po tomto zjištění se na konci polotovaru, před tavbou, vyřeže zápis o daných rozměrech, který by podle teorie měl snížit tepelný tok proudící po délce polotovaru. Tato teorie byla ověřena teplotní analýzou, kdy po vyřezání zápichu se teplota snížila v místě styku s aktuátorem na teplotu 125,34 °C. Výsledek teplotní analýzy po úpravách polotovaru je patrný z obr. 38.



Obr. 37 Teplotní pole zbylé části polotovaru po procesu tavení



Obr. 38 Ověření snížení teplotního pole

6.2 Pevnostní analýza rámu

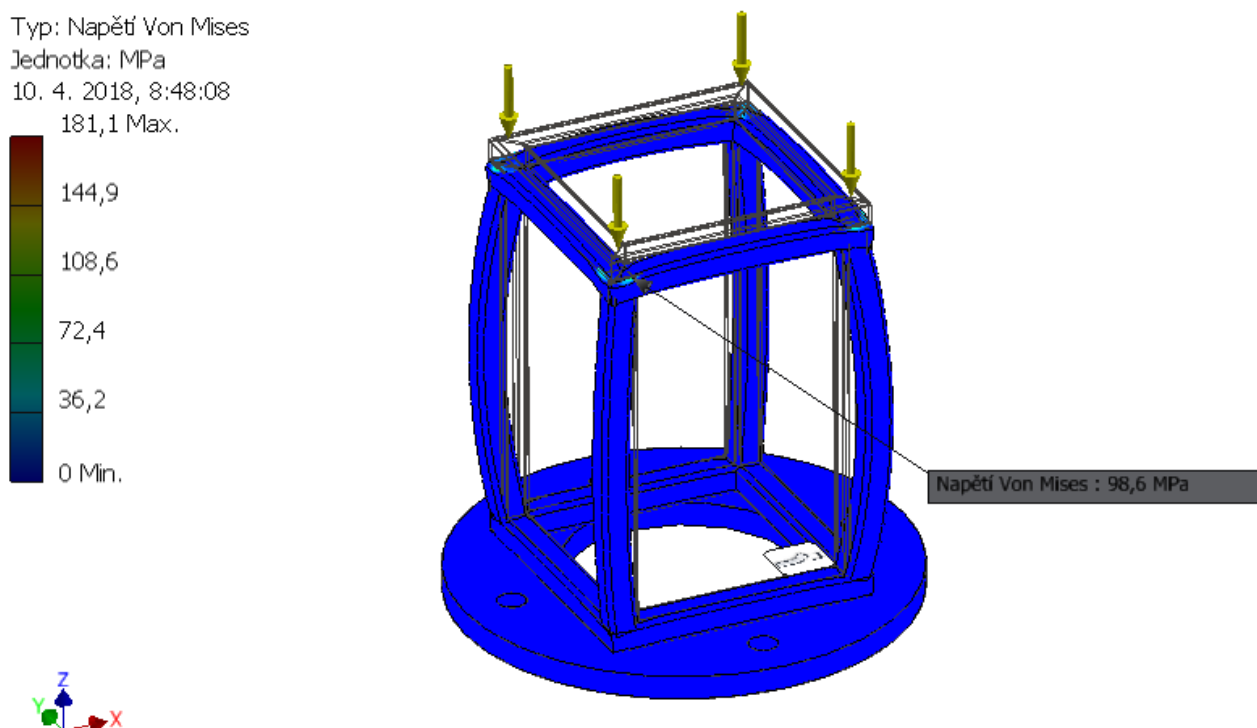
Vstupní podmínky:

- Zatížení voleno 10000 N na každou stojnou nohu do uzlu
- Pevná vazba na spodní část pece
- Materiál dle výkresové dokumentace

K pevnostní analýze byl vybrán rám pece. Zatížení rámu bylo voleno s ohledem na hmotnost samotné pece a k ní přičtená přibližná hmotnost chladicí vody v okruhu navýšená a koeficient bezpečnosti. Celkové zatížení rámu bylo voleno 40000N, což odpovídá přibližně 4000 kg.

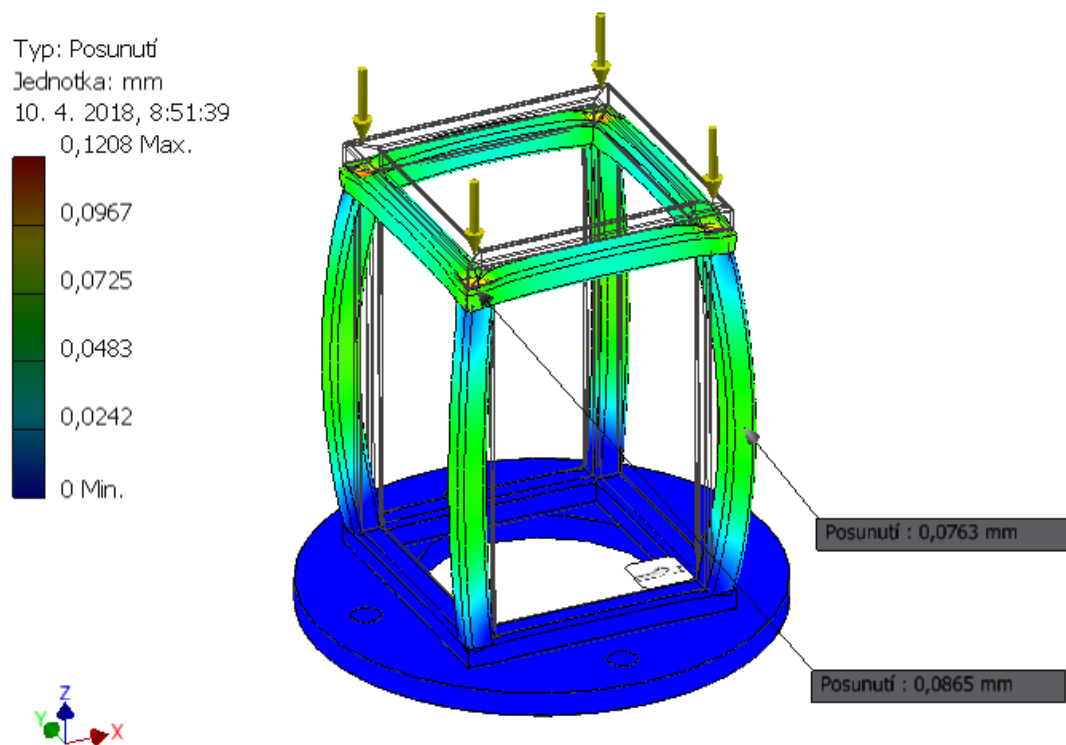
Zatížení bylo rozděleno rovnoměrně do každé stojné nohy a sledovalo se celkové maximální napětí a deformace v jednotlivých osách.

Na obr. 39 je znázorněno celkové maximální napětí v součásti. Výsledné napětí z přehledem odpovídá dovolené hodnotě materiálu.



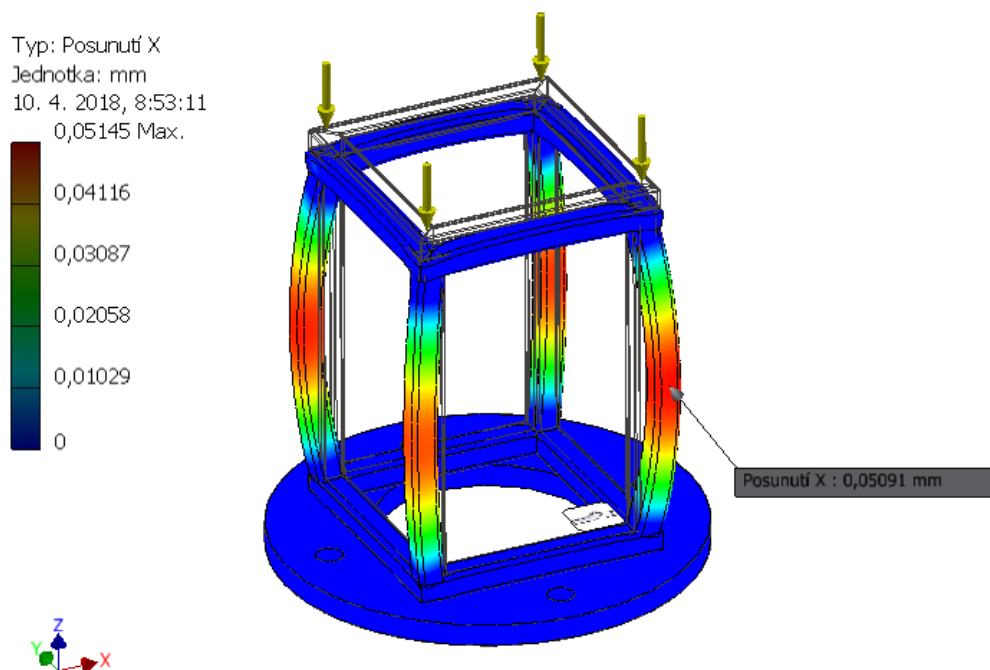
Obr. 39 Celkové napětí

Na obr. 40 je zobrazeno celkové posunutí konstrukce. Celkové maximální posunutí konstrukce je, dle výpočtu programem, 0,12 mm.



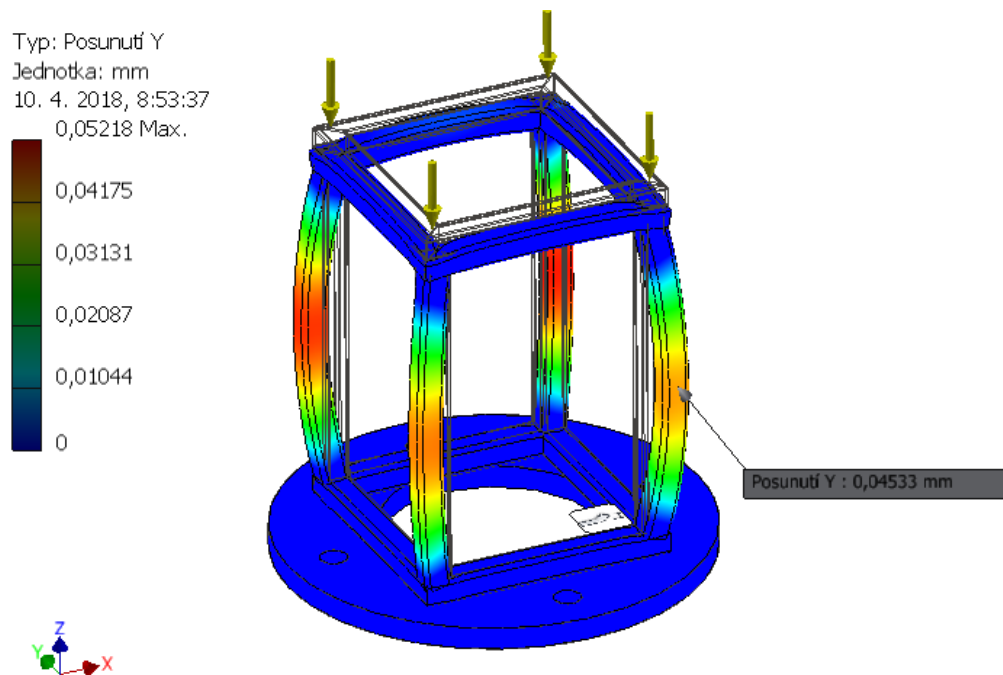
Obr. 40 Celkové posunutí

Na obr. 41 je zobrazeno celkové maximální posunutí v ose „x“. Celkové maximální posunutí v ose „x“ je 0,05 mm.



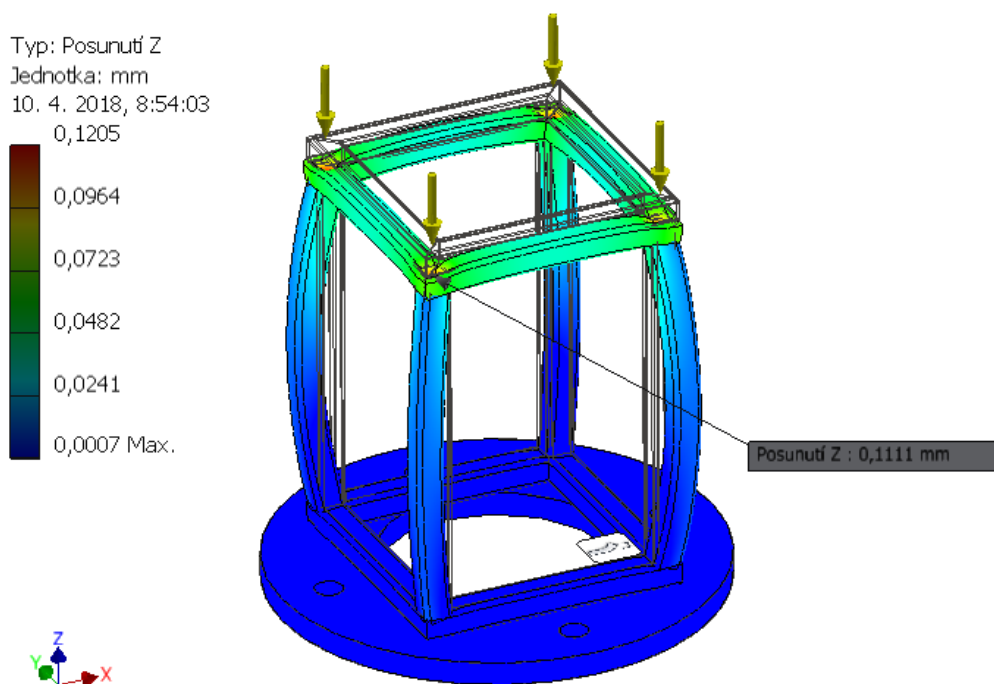
Obr. 41 Posunutí v ose „x“

Na obr. 42 je zobrazeno celkové maximální posunutí v ose „y“. Celkové maximální posunutí v ose „y“ je rovněž 0,05 mm.



Obr. 42 Posunutí v ose „y“

Posunutí v poslední ose „z“ je sledování celkového snížení rámu důsledkem zatěžující síly. Po provedení simulace bylo zjištěno, že celkové snížení (posunutí v ose „z“) je 0,12 mm.



Obr. 43 Posunutí v ose „z“

Závěrem analýzy lze prohlásit, že rám navržený pod plazmovou pec, vydrží zatížení, které vyvolají zbylé díly plazmové pece + jejich naplnění chladicím médiem a to i díky naddimenzování zatížení aplikovaného na rám.

7 Závěr

Cílem práce byl návrh laboratorní plazmové pece pro přetavování titanu, niklu nebo jejich kombinací na polotovary nové k dalšímu zkoumání. V první části práce byla zpracována rešerše vybraných částí budoucí pece. Po zpracování teoretické části práce, jako je orgánová struktura, morfologická matice, upřesnění zadání, požadavkový list byla vytvořena hrubá stavební struktura, ve které jsou zobrazeny hlavní rozměr plazmové pece a její kotvení do podkladu.

Nejprve byly navrženy jednotlivé části plazmové pece. U každé části pece bylo vypočteno chlazení jak vnitřního vybavení pece, tak vnějšího pláště. Podavače byly navrženy s ohledem na velikost polotovaru a délky zdvihu. Poté byly navrženy rámy pro uchycení podavačů. Kritická místa svarů na rámu byla pevnostně ověřena výpočtem. Aktuátor pro tažení kontislitku se navrhl dle předem zvolené délky kontislitku. Na závěr byl navržen plášť pece.

Technická zpráva obsahuje popis jednotlivých částí plazmové pece a postup výroby vybraných částí. Na závěr byla provedena pevnostní a teplotní analýza vybraných částí plazmové pece v programech Autodesk Inventor Professional a Ansys, Inc.

8 Poděkování

Na závěr bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Zdeňku Nogovi, CSc., za jeho rady a vedení touto prací.

9 Použitá literatura

- [1] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [2] DORAZIL, Eduard. *Nauka o materiálu II*. 3., nezm. vyd. Brno: VUT, 1979. Učební texty vysokých škol.
- [3] *SVARWEB* [online]. [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/>
- [4] *Servo-Drive rotační a lineární pohony a technologie* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://servo-drive.cz/>
- [5] Skupina CHARVÁT Group. *CHARVÁT Group s.r.o.* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.charvat-chs.cz/>
- [6] *OHŘEV MATERIÁLU*. Ostrava, 1974, 210 s. VŠB-TU Ostrava.
- [7] HUBKA, Vladimír. *Konstrukční nauka: obecný model postupu při konstruování*. Praha: KONSERVIS, 1991, 104 s. ISBN 80-901135-0-8.
- [8] MACHÁČKOVÁ, Adéla a Lenka MRŇKOVÁ. *Průmyslové pece: studijní opora*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3589-1.
- [9] *Deep Down* [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.deepndown.cz/>
- [10] *OMEGA Engineering* [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/>
- [11] *Periodická soustava prvků* [online]. [cit. 2017-11-01]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/>
- [12] *BIBUS METALS s.r.o* [online]. [cit. 2017-12-16]. Dostupné z: <https://www.bibusmetals.cz/>
- [13] *Mezinárodní standardní číslo seriálových publikací (ISSN): ČSN ISO 3297 (01 0187)*. 3. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2000. Informace a dokumentace, 3297 (01 0187). ISSN 1335-1532.
- [14] JABLONSKÝ, David. *Konstrukční parametry plazmových pecí pro výrobu speciálních slitin: autoreferát disertační práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2222-8.
- [15] *Koolance - Superior Liquid Water Cooling Products* [online]. [cit. 2018-02-13]. Dostupné z: <http://koolance.com/>
- [16] INCROPERA, Frank P. a David P. DEWITT. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 4th ed. New York: Wiley, c1996. ISBN 0-471-30460-3.
- [17] *Ferona online* [online]. [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/>

- [18] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [19] *Elso Philips Service* [online]. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <https://www.else.sk/sk/>
- [20] *TZB-info* [online]. 2001 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/>
- [21] DRÁBKOVÁ, Sylva. *Mechanika tekutin* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2018-03-17]. ISBN 978-80-248-1508-4.
- [22] *RAVEO s.r.o: world of motion* [online]. [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: <http://www.raveo.cz/>
- [23] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů: pro 2. ročník bakalářského studia*. Ostrava, 2015, 398 s.
- [24] MACHÁČKOVÁ, Adéla. *Sdílení tepla a proudění: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2576-2.
- [25] *Úřad průmyslového vlastnictví* [online]. 2008 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://www.upv.cz/cs/sluzby-uradu/databaze-on-line.html>
- [26] *Bola: Měřicí, regulační a topenářská technika* [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.bola.cz/>
- [27] *Elektromotory SIEMENS* [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.elektromotory.net/>

10 Seznam příloh

Příloha číslo 1: CD Laboratorní plazmová pec